



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

VYUŽITÍ TERMOCHROMNÍCH SYSTÉMŮ PRO TESTOVÁNÍ DISTRIBUCE TEPLA

USING THERMOCHROMIC SYSTEMS FOR TESTING HEAT DISTRIBUTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Klimeš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Zatloukal

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Jan Klimeš

ID: 155174

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Využití termochromních systémů pro testování distribuce tepla

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy termochromismu s využitím kapalných krystalů.

Navrhněte měřicí a testovací metody pro posouzení jejich základních parametrů.

Proveďte měření základních parametrů na vybraném typu krystalů.

Ověřte možnost využití termochromních kapalných krystalů pro mapování rozložení tepla na osazené desce plošného spoje, zhodnoťte naměřené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 25.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Zatloukal

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá principy termochromismu a jeho možnými aplikacemi při testování distribuce tepla. Teoreticky jsou zde popsány jednotlivé mechanismy, které umožňují termochromní vlastnosti látek. Zvláštní pozornost je věnována cholesterickým kapalným krystalům, u nichž došlo k ověření jejich rozlišovací schopnosti pro měření tepla. Dále došlo k ověření jejich dlouhodobé životnosti v prostředí s vysokou vlhkostí vzduchu, intenzivním UV zářením, cyklickými změnami teplot či ponořením ve vodě. Také byla ověřena možnost jejich praktického využití v diagnostice při mapování distribuce tepla na osazené desce plošného spoje. Závěrem došlo k porovnání a zhodnocení této metody z hlediska přesnosti, uživatelského komfortu a ekonomické náročnosti, a to oproti komerčně dostupným termokamerám.

Klíčová slova

termochromismus, kapalné krystaly, distribuce tepla, nedestruktivní diagnostika, životnost, deska plošného spoje

Abstract

This thesis deals with principles of thermochromism and its possible applications in heat distribution testing. Theoretical part describes mechanisms which allow the thermochromic properties of the substances. Particular attention is paid to cholesteric liquid crystals. Ability to measure the heat for this type of liquid crystals was varified. Also long service life in high humidity environment, enviroment with intense UV radiation, cyclic changes in temperature or immersion in water was tested. A possibility of their practical use in diagnosis was verified as well. Specifically mapping of heat distribution on an assembled PCB. Conclusion contains comparison and evaluation of this method in terms of accuracy, user comfort and economic advantages compared to conventional infrared sensors.

Keywords

thermochromism, liquid crystals, heat distribution, nondestructive diagnostics, durability, printed circuit board

KLIMEŠ, J. *Využití termochromních systémů pro testování distribuce tepla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 113 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Miroslav Zatloukal.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Využití termochromních systémů pro testování distribuce tepla jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomovou práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomovou práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu Ing. Miroslavu Zatloukalovi za veškerou pomoc, trpělivost a ochotu, kterou mi poskytl při vedení této diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	12
Seznam grafů	12
1 Úvod	13
2 Termochromismus.....	14
2.1 Barva	14
2.2 Chromismus	14
2.3 Leuko barviva	15
2.4 Kapalné krystaly	16
2.4.1 Lyotropní kapalné krystaly	17
2.4.2 Termotropní kapalné krystaly	18
3 Optické vlastnosti kapalných krystalů.....	25
4 Užívané formy termochromních kapalných krystalů	28
4.1 Roztok nebo nezapouzdřená kapalina	28
4.2 Mikro kapsle	29
4.3 Tenká vrstva na nosiči	29
5 Příprava termochromních kapalných krystalů na bázi cholesterolu	30
6 Experimentální ověření maximální přípustné teploty	32
6.1 Výsledky měření maximální přípustné teploty	32
7 Experimentální ověření hysterezních vlastností	35
7.1 Výsledek testování hysterezního chování.....	35
8 Experimentální ověření rozlišovací schopnosti a měřicího rozsahu	36
8.1 Výsledky měření rozlišovací schopnosti a rozsahu pro měření teploty	37
9 Experimentální ověření degradačních mechanismů.....	41
9.1 Příprava a složení vzorků	41
9.1.1 Vzorek typu 1.....	42
9.1.2 Vzorek typu 2.....	42
9.1.3 Vzorek typu 3.....	43
9.1.4 Vzorek typu 4.....	44

9.1.5	Ověření homogenity termochromních vlastností vzorků	45
9.2	Testovací metody	45
9.2.1	Zvýšená vlhkost vzduchu	46
9.2.2	Ponoření ve vodní lázni	47
9.2.3	Cyklické změny teploty	47
9.2.4	Expozice intenzivnímu UV záření	47
9.3	Průběh a výsledky testování	48
9.3.1	Výsledky pro zvýšenou vlhkost vzduchu	49
9.3.2	Výsledky pro ponoření ve vodní lázni	56
9.3.3	Výsledky pro cyklické změny teploty	64
9.3.4	Výsledky expozice intenzivnímu UV záření	65
10	Využití TLC pro mapování tepla na DPS	68
10.1	Smáčení materiálů roztokem kapalných krystalů	68
10.1.1	Porovnání smáčivosti	70
10.2	Aplikace a testování vrstvy TLC na DPS	73
10.2.1	Testování TLC nanesených štětcem na část základní desky	74
10.2.2	Testování TLC nanesených štětcem na spínaný zdroj	78
10.2.3	Testování TLC nanesených stříkací pistolí na základní desku	86
11	Porovnání TLC a termokamer	98
11.1	Teplotní rozsah	98
11.2	Rozlišení a ostrost obrazu	98
11.3	Přesnost	102
11.4	Uživatelský komfort	103
11.5	Cena	103
11.6	Shrnutí porovnání	104
12	Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků	105
12.1	Základní vlastnosti a parametry	105
12.2	Degradační mechanismy	105
12.3	Využitá TLC pro mapování rozložení tepla	107
13	Závěr	109
	Použitá literatura	111

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Slovník popis
<i>CLC</i>	[-]	Cholesterické kapalné krystaly
<i>DPH</i>	[-]	Daň z přidané hodnoty
<i>DPS</i>	[-]	Deska plošného spoje
<i>HDI</i>	[-]	High-density interconnection, vysoká hustota propojů
<i>IR</i>	[-]	Infrared, Infračervené
<i>MB</i>	[-]	Mrtvé body – body vykazující ztrátu termochromních vlastností
\vec{n}	[-]	Direktor - delší strana molekul, jenž také udává orientaci optické osy
<i>NTC</i>	[-]	Negative Temperature Coefficient, Záporný teplotní koeficient
<i>PET</i>	[-]	Polyethylentereftalát
p_{xC}	[-]	Počet obrazových bodů celkové plochy vzorku
p_{xN}	[-]	Počet obrazových bodů plochy vzorku bez poškození
S_D	[-], [%]	Míra degradace udávající poměrné poškození plochy vzorku
<i>SmX</i>	[-]	Smektická mezofáze kapalných krystalů, Index "X" = "A" až "K"
<i>TLC</i>	[-]	Termochromní kapalné krystaly
<i>UV</i>	[-]	Ultraviolet, Ultrafialové
<i>UVA</i>	[-]	Ultraviolet, Ultrafialové záření typ A
<i>UVB</i>	[-]	Ultraviolet, Ultrafialové záření typ B
<i>ZBO</i>	[-]	Změna barevné odezvy - látka vykazuje jinou barvu pro stejnou teplotu
<i>ZBO2</i>	[-]	Změna barevné odezvy s více ostrými přechody

Seznam obrázků

Obr. 1: Kombinace termochromatismu a fotochromismu u fialového laktonu	15
Obr. 2: Třídění kapalných krystalů	17
Obr. 3: Uspořádání lyotropních tekutých krystalů v polárním rozpouštědle.....	17
Obr. 4: Typy uspořádání termotropních kapalných krystalů	18
Obr. 5: Vývoj kalamitické struktury kapalného krystalu při změně teploty	19
Obr. 6: Makroskopický pohled na jednotlivé mezofáze.....	20
Obr. 7: Kalamitické kapalné krystaly v nematické fázi	21
Obr. 8: Rozdíly mezi SmA (vlevo) a SmC (vpravo).....	22
Obr. 9: Spirálovitá struktura kalamitických krystalů v chirální mezofázi.....	23
Obr. 10: Rotace direktoru a stoupání závitu chirálního kapalného krystalu.....	23
Obr. 11: Diskotické kapalné krystaly v nematickém a kolumnárním uspořádání	24
Obr. 12: Vliv teploty na stoupání závitu a na vlnovou délku odraženého světla.....	26
Obr. 13: Optické vlastnosti TLC v závislosti na teplotě	27
Obr. 14: Molekula cholesterolu $C_{27}H_{46}O$	30
Obr. 15: Příprava směsi CLC.....	31
Obr. 16: Horní trojice vzorků byla exponována teplotě 60 °C až 70 °C	33
Obr. 17: Horní trojice vzorků byla exponována teplotě 75 °C až 90 °C	33
Obr. 18: Horní trojice vzorků byla exponována teplotě 95 °C	34
Obr. 19: Horní trojice vzorků byla exponována teplotě 100 °C	34
Obr. 20: Vzorky TLC po dvou měsících při 37 °C (nahore), referenční vzorky (dole) ..	35
Obr. 21: Testovaný vzorek	36
Obr. 22: Výsledek měření 1 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo	37
Obr. 23: Výsledek měření 2 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo	38
Obr. 24: Výsledek měření 3 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo	38
Obr. 25: Výsledek měření 4- viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo.....	38
Obr. 26: Výsledek měření 5 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo	39
Obr. 27: Výsledek měření 6 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo	39
Obr. 28: Výsledek měření 7 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo	39
Obr. 29: Výsledek měření 8 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo	40
Obr. 30: Výsledek měření 9 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo	40
Obr. 31: Výsledek měření 10 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo	40
Obr. 32: Vzorek typu 1	42
Obr. 33: Vzorek typu 2.....	42
Obr. 34: Vzorek typu 3.....	43
Obr. 35: Test kompatibility vzorku a kyselého prostředí sanitárního silikonu.....	43
Obr. 36: Vzorek typu 4.....	44
Obr. 37: Test kompatibility vzorku a epoxidové těsnicí hmoty.....	44

Obr. 38:Kontrola homogenity termochromních vlastností vzorků	45
Obr. 39: Exsikátor s voženými vzorky a vlhkostí vzduchu 93 %	46
Obr. 40: Mrtvé body na vzorku typu 1 po 120 h v 93 % vlhkosti	49
Obr. 41: Vzorky typu 2 po 240 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO.....	50
Obr. 42: Vzorky typu 3 po 240 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO.....	50
Obr. 43: Vzorek typu 4 po 240 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO	51
Obr. 44: Vzorky typu 2 po 360 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO.....	52
Obr. 45: Vzorky typu 3 po 360 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO2.....	52
Obr. 46: Vzorky typu 4 po 360 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO.....	52
Obr. 47: Vzorky typu 2 po 380 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO a blednutí barev na okraji.....	53
Obr. 48: Vzorky typu 3 po 480 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO2.....	53
Obr. 49: Vzorky typu 4 po 480 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO.....	54
Obr. 50: Defekt "mrtvý bod" na vzorku typu 1 po 120 h ve vodní lázni	56
Obr. 51: Vzorky typu 2 po 120 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO	57
Obr. 52: Vzorky typu 3 po 120 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO	57
Obr. 53: Rozšíření defektu "mrtvý bod" na vzorku typu 1 po 240 h ve vodní lázni.....	58
Obr. 54: Defekt "mrtvý bod" na vzorku typu 1 po 240 h ve vodní lázni	58
Obr. 55: Vzorky typu 2 po 240 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO	59
Obr. 56: Vzorky typu 3 po 240 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO	59
Obr. 57: Defekt "mrtvý bod" na vzorcích typu 1 po 360 h ve vodní lázni.....	60
Obr. 58: Vzorky typu 2 po 360 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO	60
Obr. 59: Vzorky typu 3 po 360 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO	60
Obr. 60: Vzorek typu 4 po 360 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO	61
Obr. 61: Vzorky typu 1 po 480 h ve vodní lázni, levý a střední vzorek ztratil své termochromní vlastnosti a pravý vzorek je ztratil pouze částečně.....	62
Obr. 62: Vzorek typu 1 po 480 h ve vodní lázni se ztrátou termochromních vlastností.....	62
Obr. 63: Vzorky typu 2 po 480 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO	62
Obr. 64: Vzorky typu 3 po 480 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO	63
Obr. 65: Vzorek typu 4 po 480 h ve vodní lázni s defektem ZBO	63
Obr. 66: Vzorky typu 1 po 72 hodinách expozice UVA záření.....	65
Obr. 67: Vzorky typu 1 po 144 hodinách expozice UVA záření.....	66
Obr. 68: Vzorky typu 1 po 216 hodinách expozice UVA záření.....	66
Obr. 69: Vztah povrchového napětí a smáčecího úhlu dle Youngovy rovnice	69
Obr. 70: Rozdělení smáčivosti povrchů podle velikosti smáčecího úhlu.....	70
Obr. 71: Smáčecí úhel 42° pro deionizovanou vodu na materiálu FR4	71
Obr. 72:Smáčecí úhel 13° pro izopropylalkohol na materiálu FR4	71
Obr. 73: Smáčecí úhel 23° pro roztok TLC na materiálu FR4	71
Obr. 74: Smáčecí úhel 35° pro roztok TLC na PET folii	72
Obr. 75: Smáčecí úhel 34° pro roztok TLC na pozinkovaném plechu	72

Obr. 76: Smáčecí úhel 24° pro roztok TLC na sodnovápenatém skle	72
Obr. 77: Smáčecí úhel 38° pro roztok TLC na materiálu FR4 s černým lakem	72
Obr. 78: "Airbrush" stříkáci pistole.....	73
Obr. 79: Základní deska sloužící jako základ pro testování TLC	74
Obr. 80: Oblast zvolená pro testování TLC (BIOS čip)	75
Obr. 81: Oblast zvolená pro testování TLC s vrstvou černého laku (BIOS čip)	75
Obr. 82: Oblast s vrstvou TLC nanesených pomocí jemného štětce (BIOS čip)	77
Obr. 83: Zahřátá oblast s vrstvou TLC (BIOS čip)	77
Obr. 84: Zahřátá oblast s vrstvou TLC (BIOS čip)	78
Obr. 85: Horní strana DPS spínaného zdroje s popisky jednotlivých součástek	79
Obr. 86: Spodní strana DPS spínaného zdroje	79
Obr. 87: Horní strana DPS spínaného zdroje s nanesenou vrstvou černého laku	80
Obr. 88: Spodní strana DPS spínaného zdroje s nanesenou vrstvou černého laku	80
Obr. 89: Horní strana DPS spínaného zdroje se štětcem nanesenou vrstvou TLC	81
Obr. 90: Spodní strana DPS spínaného zdroje se štětcem nanesenou vrstvou TLC	81
Obr. 91: Horní strana DPS zdroje s vrstvou TLC v čase 2:20 od zatížení zdroje	82
Obr. 92: Spodní strana DPS zdroje s vrstvou TLC v čase 2:20 od zatížení zdroje.....	82
Obr. 93: Horní strana DPS zdroje s vrstvou TLC v čase 3:20 od zatížení zdroje	83
Obr. 94: Spodní strana DPS zdroje s vrstvou TLC v čase 3:20 od zatížení zdroje.....	83
Obr. 95: Horní strana DPS s vrstvou TLC v čase 4:50 od zatížení zdroje	84
Obr. 96: Spodní strana DPS zdroje s vrstvou TLC v čase 4:50 od zatížení zdroje.....	84
Obr. 97: Horní strana DPS zdroje s vrstvou TLC v čase 12:50 od zatížení zdroje.....	85
Obr. 98: Spodní strana DPS zdroje s vrstvou TLC v čase 12:50 od zatížení zdroje.....	85
Obr. 99: Základní deska s vrstvou s vrstvou TLC nanesených stříkáci pistolí.....	86
Obr. 100: Základní deska s vrstvou s vrstvou TLC, 1 minutu 10 sekund od zapnutí	88
Obr. 101: Dolní pravý roh s vrstvou TLC, cca 1 minutu od zapnutí	89
Obr. 102: Chladič na základní desce s vrstvou TLC, přibližně 1 minutu od zapnutí	89
Obr. 103: Základní deska s vrstvou TLC, 4 minuty od zapnutí.....	90
Obr. 104: Levý horní roh základní desky s vrstvou TLC, cca 4 minuty od zapnutí.....	91
Obr. 105: Chladič na základní desce s vrstvou TLC, cca 4 minuty od zapnutí.....	91
Obr. 106: Základní deska s vrstvou TLC, 6 minut od zapnutí.....	92
Obr. 107: Dolní pravý roh základní desky s vrstvou TLC, cca 6 minut od zapnutí	93
Obr. 108: Základní deska s vrstvou TLC, 9 minut od zapnutí.....	94
Obr. 109: Dolní levý roh základní desky s vrstvou TLC, přibližně 9 minut od zapnutí	95
Obr. 110: Základní deska s vrstvou TLC, 18 minut od zapnutí.....	96
Obr. 111: CPU chladič s vrstvou TLC, cca 1 minutu po vypnutí desky	97
Obr. 112: Horní a spodní strana spínaného zdroje nasnímaná termokamerou FLIR i7	99
Obr. 113: Horní strana DPS spínaného zdroje	100
Obr. 114: Spodní strana DPS spínaného zdroje	100
Obr. 115: Základní deska nasnímaná termokamerou FLIR i7	101

Obr. 116: Základní deska s vrstvou TLC	101
Obr. 117: Snímek DPS pořízený kamerou FLIR E60	102

Seznam tabulek

Tab. 1: Složení směsí kapalných krystalů pro různé teplotní intervaly.....	30
Tab. 2: Výsledky maximální přípustné teploty	32
Tab. 3: Výsledky z měření a zpracování na teplotní intervaly	37
Tab. 4: Shrnutí kvantifikovaných výsledků degradace při 93 % vlhkosti vzduchu.....	55
Tab. 5: Legenda k Tab. 4.....	55
Tab. 6: Shrnutí kvantifikovaných výsledků degradace při ponoření ve vodní lázni.....	64
Tab. 7: Legenda k Tab. 6.....	64
Tab. 8: Velikosti smáčecích úhlů roztoku kapalných krystalů pro různé povrchy	72
Tab. 9: Převodní tabulka barev použitých TLC pro jednotlivé teplotní intervaly	76
Tab. 10: Shrnutí srovnání termochromních kapalných krystalů a termokamer.....	104

Seznam grafů

Graf 1: Degradace vzorků při relativní vlhkosti vzduchu 93 %	55
Graf 2: Degradace vzorků při ponoření ve vodní lázni	64

1 Úvod

Teplota patří mezi jednu z nejčastěji měřených fyzikálních veličin napříč obory lidské činnosti. Způsoby jejího měření jsou různorodé, a to od těch nejstarších v podobě uzavřeného válce naplněného expandující kapalinou nebo bimetalových plíšků až po modernější způsoby v podobě termočlánků a kamer pracujících v infračerveném spektru elektromagnetického záření. V oblasti elektrotechnického průmyslu je měření teploty a oteplení zvláště důležité, kvůli prevenci degradace jednotlivých elektrotechnických součástí, základních a izolačních materiálů. Tyto měření či zkoušky mohou být prováděny již zmiňovanými termočlánky nebo pomocí moderních termokamer, jež poskytují komplexní informace o rozložení tepla na daném zařízení a jeho prvcích, a to v podobě termografu. Mezi málo prozkoumané a nepříliš využívané způsoby měření tepla patří využití termochromních kapalných krystalů, jež vykazují jedinečnou vlastnost v podobě změny barevné odezvy svého povrchu v závislosti na teplotě.

Cílem této práce je prozkoumat principy termochromního charakteru kapalných krystalů jak po teoretické, tak praktické stránce. Praktická část bude věnována určení základních parametrů termochromních kapalných krystalů. Mezi tyto parametry patří teplotní rozsah, náchylnost k hysterezi, maximální přípustná teplota a působení různých degradačních vlivů jako jsou cyklické změny teploty, zvýšená vlhkost vzduchu, přímé ponoření ve vodě a expozice intenzivnímu ultrafialovému záření. Dále bude praktická část věnována skutečnému použití těchto krystalů při mapování tepelného zatížení DPS a na ní osazených součástek. Poslední kapitola této práce bude věnována vyhodnocení schopnosti technologie kapalných krystalů obstát a nabídnout nějaké výhody oproti, již zmiňovaným termokamerám.

2 Termochromismus

Základním elementem této práce je jev zvaný termochromismus. Tento jev spočívá ve změně vlnové délky elektromagnetického záření odrážejícího se od látky, a to v závislosti na teplotě dané substance. Termochromismus vykazují různé látky, přičemž se dělí na dvě hlavní skupiny, a to leuko barviva a kapalně krystalové. Následující kapitola se věnuje vysvětlení těchto jednotlivých kategorií a objasňuje, jakým způsobem u nich dochází k termochromnímu efektu. [1]

2.1 Barva

Je vlastnost látky, respektive světla, které z této látky vychází nebo se odráží. Každá barva má svůj specifický rozsah vlnových délek. Barva konkrétních objektů záleží na jeho fyzikálních vlastnostech a také na pozorovateli. V případě, že těleso světlo vyzařuje, tak spektrum tohoto záření je dané především materiálovým složením tělesa a také formou a intenzitou energie, které těleso uvedla do stavu vyzařování. Pokud těleso odráží světelné záření, tak barva tělesa záleží opět na materiálovém složení, které určuje, které vlnové délky a s jakou intenzitou jsou pohlceny a které naopak odrazeny. Dále samozřejmě záleží na spektru dopadajícího záření.

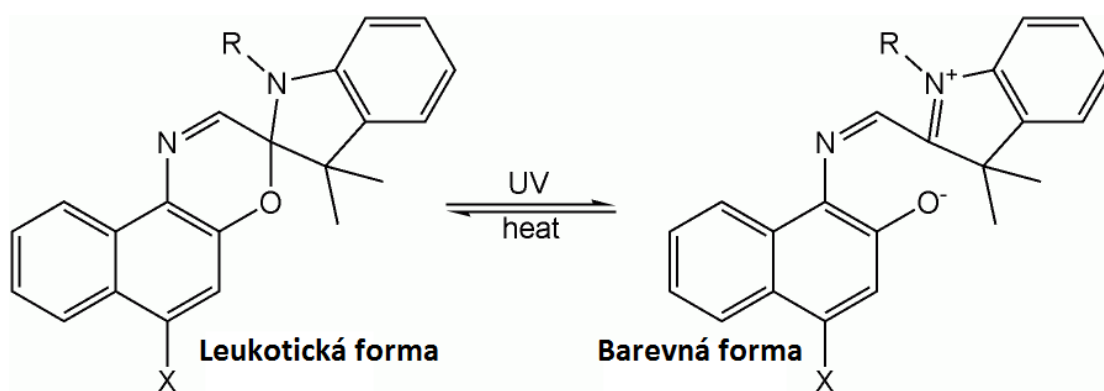
2.2 Chromismus

Dle [1] je chromismus reverzibilní nebo ireverzibilní změna barvy materiálů vyvolávaný různými stimuly. Dle podstaty podnětu, který změnu vyvolá, můžeme chromismus dělit do následujících kategorií.

Ionochromismus	stimul v podobě iontů
Hygrochromismus	stimul v podobě vlhkosti
Solvatochromismus	změna emisního spektra v závislosti na použitém rozpouštědle
Chemochromismus	změna barvy při kontaktu s chemikáliemi (indikace jedů...)
Elektrochromismus	změna barvy pokud je látka vystavena elektrickému napětí
Piezochromismus	stimul v podobě tlaku
Termochromismus	stimul v podobě teploty
Fotochromismus	stimul v podobě elektromagnetického záření
Halochromismus	stimul v podobě změny pH

2.3 Leuko barviva

Název je odvozen z řeckého slova *leukos*, které znamená „bílý“. Jedná se o barvu, která je schopna měnit svoji formu z transparentní (leukotická forma) na barevnou, a to na základě změny pH, osvětlení nebo právě teploty. Tyto změny jsou ve většině případů reverzibilní, ale vyskytují se i ireverzibilní formy. U mnoha aplikací je také možné kombinovat více jevů dohromady, jako například u krystalů fialového laktonu, které za působení tepla přechází z bezbarvé formy do formy barevné a zpětná reakce je způsobena působením UV záření. Tento děj je zobrazený na Obr. 1. Jedná se tedy o kombinaci termochromismu a fotochromismu.



Obr. 1: Kombinace termochromatismu a fotochromismu u fialového laktonu [3]

Termochromismu je možné docílit i pomocí zástupné reakce. Například pokud máme reakci leuko barviva citlivého na pH (halochromismus), tak můžeme, k danému barvivu přidat kyselinu či zásadu v pevné formě, kdy s barvivem neinteraguje. Avšak po zahřátí dojde ke skupenské přeměně kyseliny či zásady a ta začne ovlivňovat pH daného barviva, které následně změní barvu. Tímto způsobem bylo změnou teploty docíleno změny barvy, tudíž se jedná o termochromismus, ale jako prostředník k této změně slouží halochromická reakce. Jako barviva jsou používána spirolacty, fluorany, spiropyran a fulgidy a jako kyseliny pro výše zmíněnou změnu pH se používají bisphenol A, parabeny, 1,2,3-triazol. Pravděpodobně nejrozšířenější aplikace těchto barev je u termotiskáren a také u některých indikátorů kyselosti.

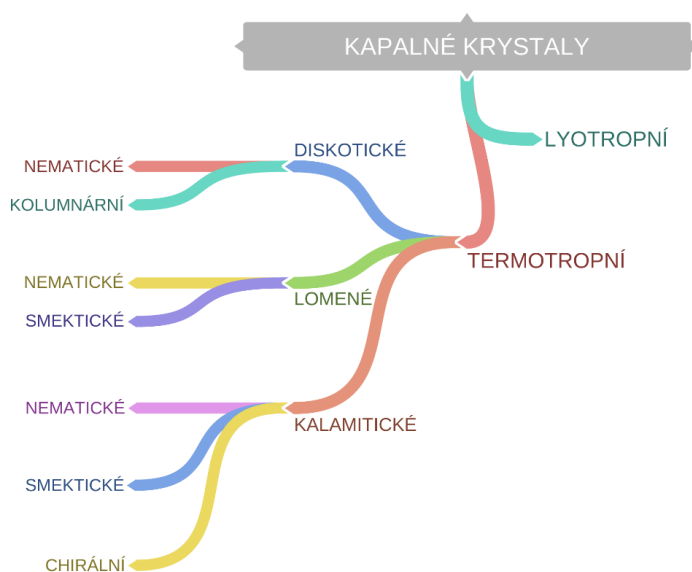
Leuko barviva nejsou schopny, tak diskrétních přechodů jako například aplikace založené na tekutých krystalech. Jejich použití se hodí spíše pro indikaci stavů jako „chladné, vlažné, horké“, než pro přesné měření teplot. Rozsah teplot, které je možné těmito barvivy indukovat se pohybuje v rozmezí -5 °C až 60 °C.

Tyto vlastnosti určují, že leuko barviva jsou používané především pro spotřebitelské než průmyslové aplikace. Dobrým příkladem může být indikátor ukazující, zdali je nápoj správně vychlazen. Nádobí, které uživateli ukáže, na jakou teplotu je pokrm či nápoj ohřátý. Oblečení, které mění vzhled při různé teplotě okolí. Kapota automobilu, která při nastartovaném motoru změní svůj vzhled. Monočlánek, kde při spojení kladného a záporného pólu prsty dojde o ohřátí indikátoru elektrickým proudem, který je úměrný zbývajícimu napětí monočlánu. Životnost leuko barev je ovlivněná především expozicí UV záření a příliš vysoké teplotě okolo 200 °C až 230 °C. Ovšem při krátkodobé aplikaci (především při výrobním procesu), je možné dosáhnout teplot až 250 °C. [2]

2.4 Kapalně krystaly

Kapalně krystaly vykazují zajímavé vlastnosti, které se nacházejí na pomezí mezi tekutým a tuhým stavem látky. Tento stav se nazývá mezofáze a jako jev byl pozorován již v polovině 19. století trojicí chemiků Mettenheimerem, Virchowem a Valentinem. Objev tohoto stavu látky je vázán na výzkum látky myelin. Pod polarizovaným světlem tato látka vykazovala anizotropní vlastnosti, které jsou typické pro krystaly a zároveň vlastnosti jako tečení, které je typické pro kapaliny. V roce 1888 objevil Rakouský botanik Friedrich Reinitzer fázi kapalných krystalů. Stalo se tak při zahřívání látky na bázi cholesterolu $C_{24}H_{46}O$ na teplotu 145,5 °C, kdy látka začala zároveň vykazovat ony zvláštní vlastnosti kapaliny s krystalickou strukturou. Tyto vlastnosti si látka byla schopna uchovat do teploty 178,5 °C, kdy látka zcela přešla do kapalného skupenství. Obecně může látky vykazující tyto vlastnosti nazývat mezogeny. [4]

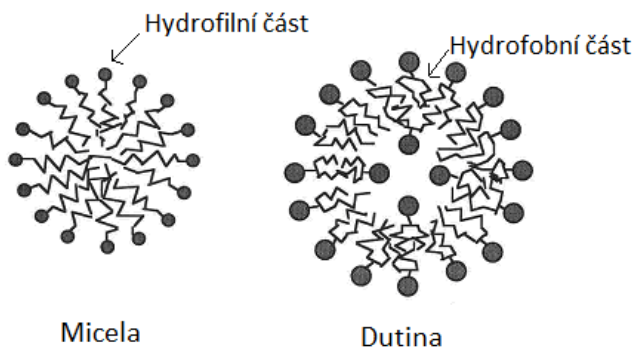
Praktický význam mezogenů je především v odezvě krystalické struktury na vnější podněty jako elektrické a magnetické pole, teplotu či tlak. Právě díky těmto odezvám našly kapalně krystaly široké uplatnění v zobrazovací technice, fotovodičích, zařízení emitující polarizované světlo, světelných modulátorech, polymerech pro vysoké napětí a u chemických, termických a elektrických senzorů. Mezofáze můžeme docílit dvěma způsoby, a to zahříváním nad teplotu tání, v tom případě se jedná o takzvanou termotropní kapalně krystalickou fázi a v současné době je objeveno okolo 70 tisíc látek vykazující tyto vlastnosti. Druhá možnost je rozpuštění látky ve vhodném roztoku. Takové kapalně krystaly se nazývají lyotropní a tvorba mezofáze se řídí koncentrací roztoku. Toto třídění, které se dále větví je zobrazeno na Obr. 2, který pomůže při dalším popisu jednotlivých kategorií a fází. [4],[5]



Obr. 2: Třídění kapalných krystalů [5]

2.4.1 Lyotropní kapalné krystaly

Jak již bylo zmíněno, tak lyotropní kapalné krystaly dosáhnout mezofáze ve specifickém typu rozpouštědla a stabilita této mezofáze je řízena koncentrací roztoku rozpouštědla. Toto chování důsledkem kombinace hydrofilní a hydrofobní struktury a látka vykazující obě tyto vlastnosti zároveň se nazývá látkou amfifilní. Samostatná látka bez rozpouštědla má neuspořádaný charakter, ale jakmile přidáme polární rozpouštědlo (například vodu), molekuly se uspořádají tak, aby hydrofilní část směřovala k vodě, a naopak hydrofobní část směřovala dovnitř. Tímto způsobem se vytváří micely. Pokud se použije jako rozpouštědlo fosfolipid, tak se vytvoří dutina, viz Obr. 3. Při použití nepolárního rozpouštědla, bude situace opačná a to tak, že hydrofobní částí budou vně a hydrofilní uvnitř. Takové uspořádání nazýváme inverzní micelou. [5]

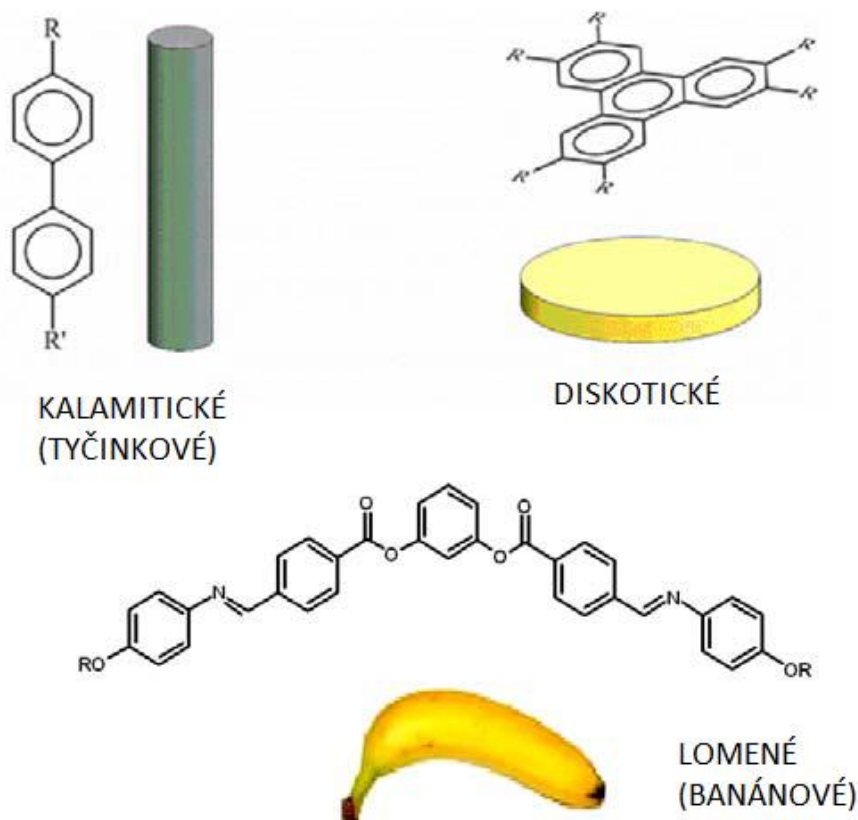


Obr. 3: Uspořádání lyotropních tekutých krystalů v polárním rozpouštědle [5]

2.4.2 Termotropní kapalné krystaly

Termotropní kapalné krystaly dosáhnout mezofáze pomocí teploty ve správném intervalu, a to většinou od teploty tání až po kritickou teplotu, kdy v důsledku tepelného pohybu dojde k rozbití jemné struktury mezofáze a látka se stává čistě likvidní. V opačném případě, kdy látka bude chladnější než bod tání, dojde ke krystalizaci a látka tím ztratí svoji molekulární mobilitu. Během přechodu z teploty tání až na teplotu kritickou projde struktura mezofáze několika fázemi (nematická, smectická, chirální), které jsou podrobněji popsány v následující podkapitole. [5]

Termotropní kapalné krystaly je možné rozlišit podle uspořádání molekul na tyčinkový (kalamitické), diskotické a lomené (banánové). Grafické znázornění jednotlivých uspořádání je na Obr. 4. K objevu jednotlivých typů uspořádání docházelo postupně. Tyčinkové uspořádání je známé přes sto let, diskotická struktura byla zkoumána od roku 1977 a oblast lomených kapalných krystalů je předmětem zájmu od roku 1996. [5]

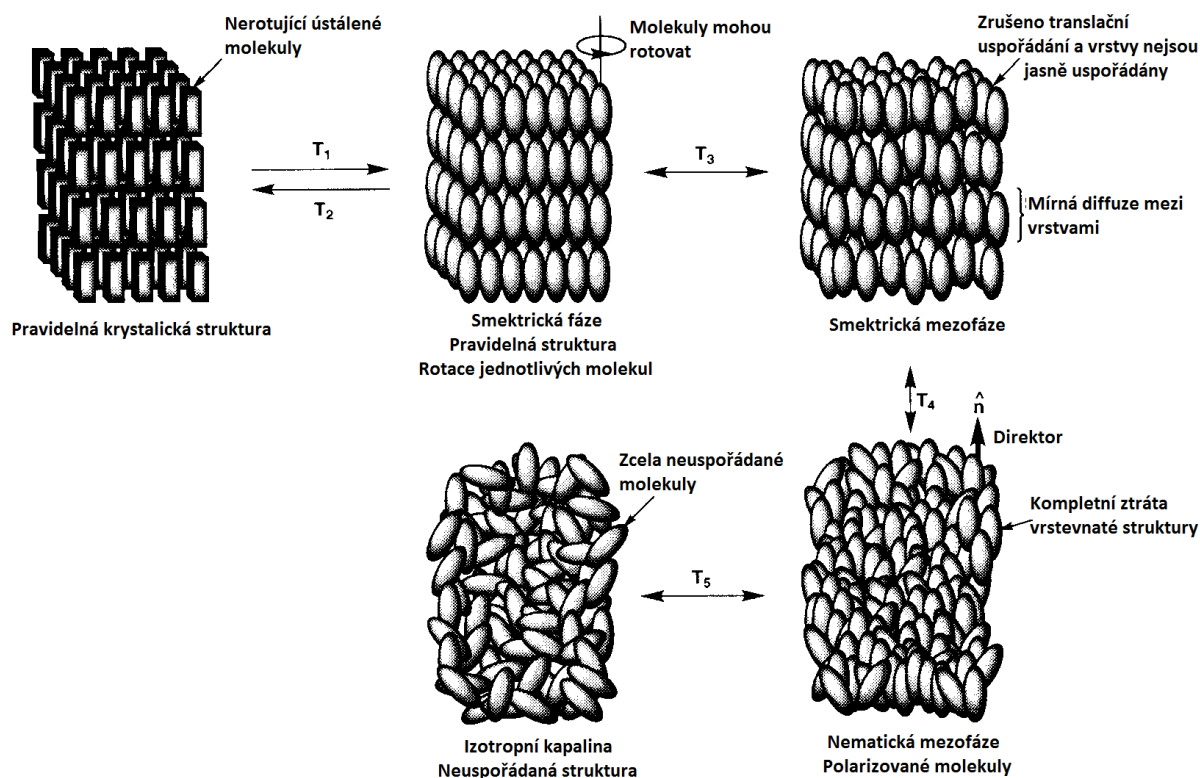


Obr. 4: Typy uspořádání termotropních kapalných krystalů [5]

Typickým znakem termotropních kapalných krystalů je struktura složená ze dvou částí. První část je rigidní a je tvořena aromatickými zbytky a druhá část, která je flexibilní a je složena z akrylových řetězců. V důsledku této duální struktury je možné pozorovat spojení molekulární mobility (zajišťují flexibilní řetězce) a krystalickou pravidelnou strukturu (zajišťuje rigidní jádro). [5]

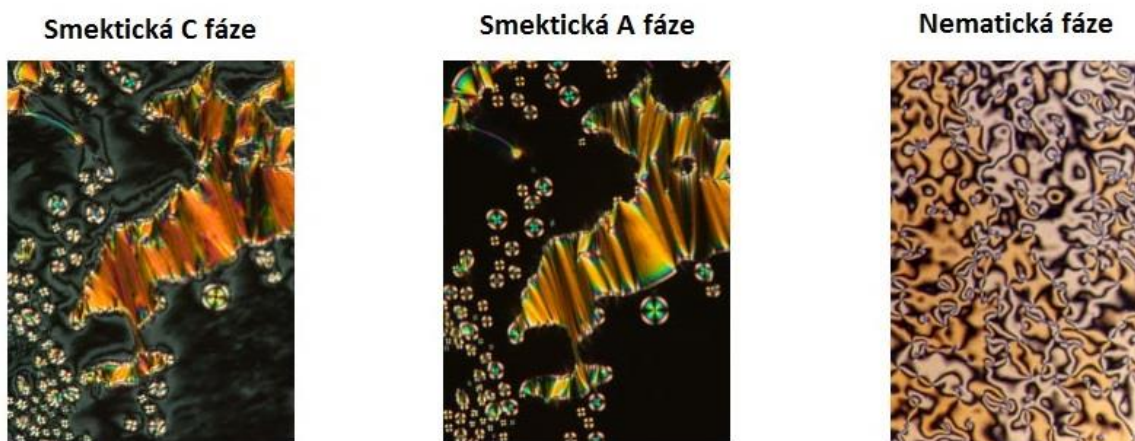
Kalamitické (tyčinkové) kapalné krystaly

Tato skupina obsahuje největší množství doposud pozorovaných termotropních kapalných krystalů a jak již bylo zmíněno, tak jejich struktura je složena z rigidního jádra a flexibilního řetězce. Pokud je látka pod bodem tuhnutí, jádra i řetězce jsou pevně svázány silnými přitažlivými vazbami a látka vykazuje anizotropní charakter. S narůstající teplotou dochází k povolování vazeb a krystalická struktura se uvolňuje. Toto je doprovázeno přechodem mezi jednotlivými fázemi, jak je naznačeno na Obr. 5. První struktura je čistě krystalická a jedná se o látku, která je pod teplotou tání. Molekuly jsou pevně vázané a látka vykazuje anizotropní strukturu. Při zvýšení teploty o teplotu T_1 dojde k částečnému přerušení přitažlivých sil a vzniku smektrické mezofáze. V této fázi mohou molekuly rotovat kolem své osy, ale látka stále vykazuje silně vrstevnatou strukturu. [5]



Obr. 5: Vývoj kalamitické struktury kapalného krystalu při změně teploty [5]

Při dalším zvýšení teploty o teplotu T_3 , dojde k zrušení tlanslačního uspořádání a vzniká lamelární vrstevnatá struktura, kde jednotlivé vrstvy nejsou jasně definovány. Následné zvýšení teploty o teplotu T_4 způsobí vznik nematické fáze, která má pouze orientační uspořádání. Další zvýšení o teplotu T_5 způsobí kompletní rozpad jakékoliv pravidelné struktury a dojde k přeměně na izotropní kapalinu. Tento postup je pouze obecný a u konkrétních látek se může lišit. Běžně se u mezogenů vyskytuje jedna až tři mezofáze. Na Obr. 6 jsou snímky jednotlivých mezofází, ukazující změnu z makroskopického hlediska. [5]



Obr. 6: Makroskopický pohled na jednotlivé mezofáze [7]

Kalamitické kapalné krystaly v nematické mezofázi

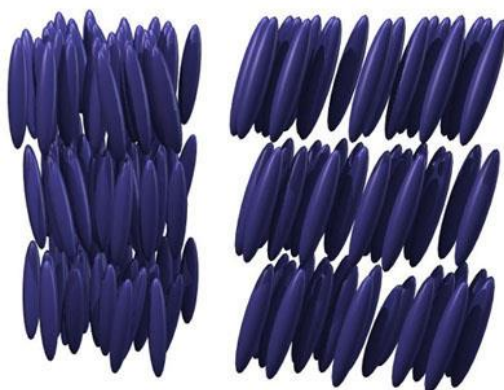
Nematická fáze je nejméně uspořádanou mezofází, kdy při dalším zvýšení teploty přejde látka do izotropní kapaliny. Nízký stupeň provázanosti umožňuje tečení ve všech třech směrech s poměrně nízkou viskozitou, což umožňuje rychle změny orientace krystalů v elektrickém poli, a tudíž použití kapalných krystalů v zobrazovací technice. Optické vlastnosti krystalů v nematické mezofázi jsou podobné jako u jednoosých krystalů. Optická osa je orientována ve směru delší strany molekul a tento směr se nazývá direktor \vec{n} . [5],[6]



Obr. 7: Kalamitické kapalné krystaly v nematické fázi [8]

Kalamitické kapalné krystaly ve smektické mezofázi

Smektická mezofáze je charakteristická tím, že molekuly jsou schopny rotovat a pohybovat ve své vrstvě a ve velmi omezeném množství i mezi vrstvami, které nejsou striktně definovány. Vlastnosti smektické mezofáze se blíží spíše tuhým látkám než kapalině, avšak optické vlastnosti se blíží jednoosému anizotropnímu dielektriku. Rozdíly mohou být i mezi jednotlivými smektickými mezofázemi, které se dále dělí do podkategorií SmA, SmB, SmC, SmD, SmE, SmF, SmG, SmH, SmI, SmJ a SmK. Tyto označení představují pouze chronologické seřazení, kdy byly tyto smektické fáze pozorovány. Například smektická mezofáze SmA mají orientaci delší strany molekul kolmou na vrstvu a molekuly se mohou omezeně pohybovat mezi vrstvami. U upořádání SmB je to stejné jako pro SmA, ale s tím rozdílem, že molekulám není umožněn pohyb mezi vrstvami. Další uspořádání SmC je charakteristické tím, že osa molekul není kolmá na vrstvu a může být pootočena od normály o určitý úhel, který je závislý na teplotě. U mezofázi typu SmJ, SmG, SmH a SmK je možné pozorovat korelace mezi vrstvami i na dlouhou vzdálenost, a tudíž už není zcela jednoznačné, zdali se jedná o kapalné krystaly nebo o orientované neuspořádané látky v tuhém skupenství. Na Obr. 8 je možné vidět rozdíly v úrovni uspořádání mezi molekulami ve smektické mezofázi typu A a typu C, která je vůči normále pootočena. [5]



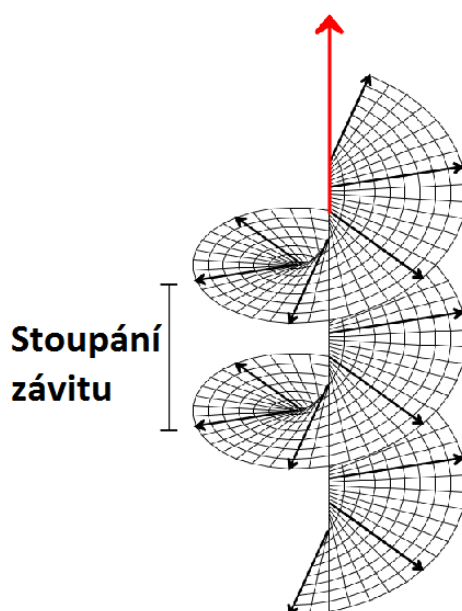
Obr. 8: Rozdíly mezi SmA (vlevo) a SmC (vpravo) [8]

Kalamitické kapalné krystaly v chirální mezofázi

Kapalné krystaly v chirální nematické mezofázi vykazují levotočivou či pravotočivou spirálovitou strukturu. Takovéto uspořádání molekul je zobrazeno na Obr. 9. Chirální nematická mezofáze je opět tvořena paralelně uspořádanými molekulami s direktorem \vec{n} . Tento direktor je pro každou vrstvu jiný a při pozorování delšího úseku je rozpoznatelná spirálovitý charakter direktoru, jak je znázorněno na Obr. 10. Stoupání daného závitu spirálovité struktury je dáno teplotou kapalných krystalů. Pro vyšší teploty platí, že molekuly jsou volnější, a tudíž direktor se může měnit rychleji, což způsobí nižší stoupání závitu (stejný direktor se na konstantní délce objeví vícekrát). Naopak s nižší teplotou se pojí nižší pohyblivost molekul, a tudíž i vyšší stoupání chirální struktury. Důležitou vlastností chirálně nematické struktury je možnost selektivně odrážet světlo. Konkrétně dokáže odrazit světlo o vlnové délce odpovídající délce stoupání závitu. Tato vlastnost je fundamentální pro použití chirálně nematických kapalných krystalů pro termochromní aplikace jako teploměry, inkousty, chytré textilie, barvy atd. Kapalné krystaly vykazující chirální mezofázi bývají nejčastěji kapalné krystaly založené na bázi molekuly cholesterolu, takové kapalné krystaly jsou proto označovány jako cholesterické (CLC – cholesteric liquid crystals). [5],[8]



Obr. 9: Spirálovitá struktura kalamitických krystalů v chirální mezofázi [8]



Obr. 10: Rotace direktoru a stoupání závitu chirálního kapalného krystalu [11]

Diskotické kapalně krystaly

Diskotické kapalně krystaly se vyskytují ve dvou fázích. První fáze je nematická a vyznačuje se tím, že většina molekul je s ohledem na svoji kratší osu paralelně orientována. Pro lepší ilustraci je možné nematickou fázi simulovat rozpadem mincí po stole. Druhá fáze obsahuje molekuly v takzvaném polohovém uspořádání, která vyplývá z náchylnosti k samovolnému uspořádání do sloupců. Ty pak vytvářejí roviny kolmé na sloupce, a to v uspořádání do pravoúhle nebo hexagonálně dvourozměrné mřížky. Tato konečná fáze se nazývá kolumnární fáze nebo také sloupcovitá fáze.

Se změnou teploty může docházet i k odklonu některých molekul od normály, stejně jak tomu bylo u smectické fáze kalamitických krystalů. Rozdíl mezi nematickou fází a kolumnární fází je vyobrazen na Obr. 11. Mezi běžně užívané aplikace diskotických kapalných krystalů patří použití v LCD a OLED panelech nebo například ve fotovoltaických zařízeních. [5]



Obr. 11: Diskotické kapalné krystaly v nematickém a kolumnárním uspořádání [8]

Lomené kapalné krystaly

Lomené kapalné krystaly byly popsány již během třicátých let dvacátého století, ale pro jejich tvar nebyly považovány za užitečné a na své znovuobjevení museli počkat až do roku 1996, kdy bylo předpovězeno, že molekuly s tímto tvarem by mohli vytvářet polární fáze s antiferoelektrickými vlastnostmi, a to i bez chirálního prvku, který je obvykle nákladný a obtížný na syntézu. Právě díky možnosti redukce nákladů se oblast lomených kapalných krystalů stala předmětem intenzivního výzkumu. [5]

Lomené krystaly vytváření převážně smectické fáze. Nematická fáze se u tohoto typu vyskytuje výjimečně. Stavba lomených kapalných krystalů je založena na rigidním jádře a dvojici ramen, které v ideálním případě svírají úhel 120° , případně se úhel sevření pohybuje v intervalu (110° až 140°). Pro syntézu struktury lomených kapalných krystalů je tedy důležité vybrat správný prvek pro konstrukci samotného rigidního jádra. V současnosti se využívá 1,3-substituovaného benzenu a jeho molekul od něj odvozených, jako například benzen-1,3-diolu a naftalen-2,7-diolu. [5]

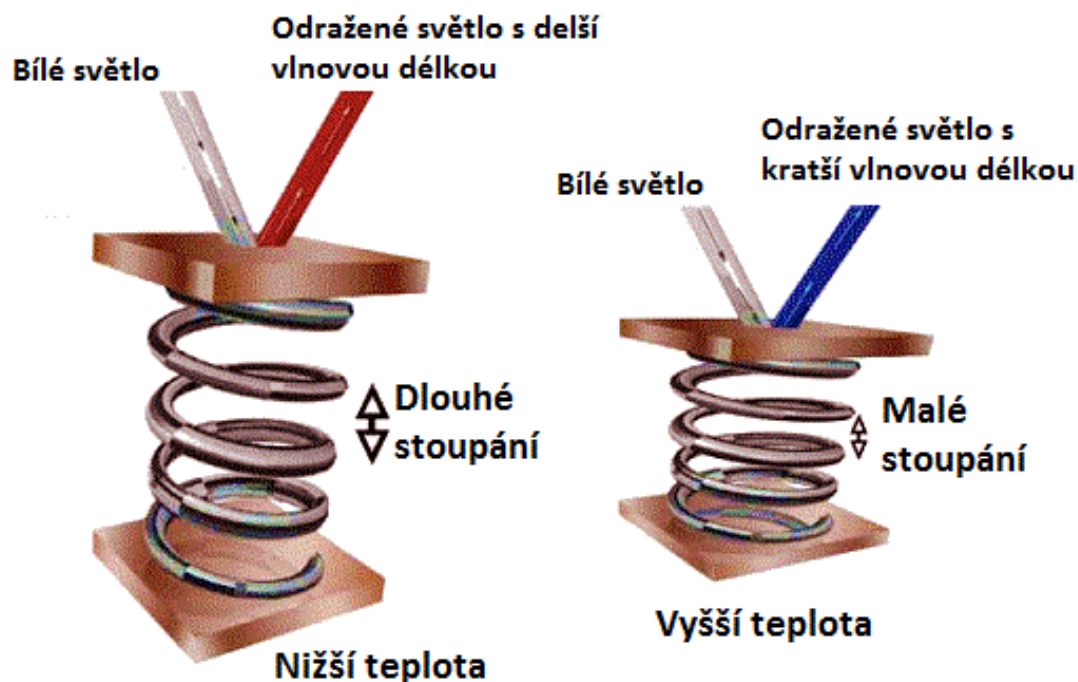
Pro požadované optické vlastnosti je potřeba dosáhnout potřebné chiralitu v makroskopickém měřítku. Toho je dosaženo těsným uspořádáním molekul, vznikem polarizace a pootočení molekul o určitý úhel od normály. [5]

3 Optické vlastnosti kapalných krystalů

Nematické kapalně krystaly mají charakter opticky jednoosého materiálu, kdy tato osa je rovnoběžná s direktorem. V důsledku anizotropní struktury materiálu dochází u kapalných krystalů ke dvojlomu světla, který je způsobený rozdílnou rychlostí šíření světla v různých směrech. Paprsek se zde rozdělí na paprsky dva, z nichž jeden se nazývá *řádný* a druhý *mimořádný*. Tím zároveň dojde k polarizaci obou paprsků. [9], [10]

Unikátní vlastnosti můžeme pozorovat u zkroucených kapalných krystalů, které jsou schopny potočit rovinu polarizovaného světla o 90° , tudíž dokáže propustit světlo i mezi zkříženými polarizátory, a to bez ohledu na tloušťku vrstvy, kterou světlo musí procházet. V souvislosti termochromismem, je důležité poznat optické vlastnosti kapalných krystalů, které mají chirální charakter. Nejdůležitějším parametrem u chirálních kapalných krystalů, je stoupání závitu chirálně nematických molekul. Dále je důležité, v jakém uspořádání se molekuly nachází. Pro termochromní využití kapalných krystalů je důležitá Grandjeanova textura, která má osy spirál kolmé na jednotlivé vrstvy. Druhou možností je ohniskově kuželové uspořádání, při kterém jsou osy spirál orientovány zcela náhodně a tekuté krystaly v takovém uspořádání intenzivně rozptylují světlo. Pomocí tlaku či elektrického pole je možné formovat kapalně krystaly z ohniskově kuželového uspořádání do Grandjeanovi textury a naopak. [6]

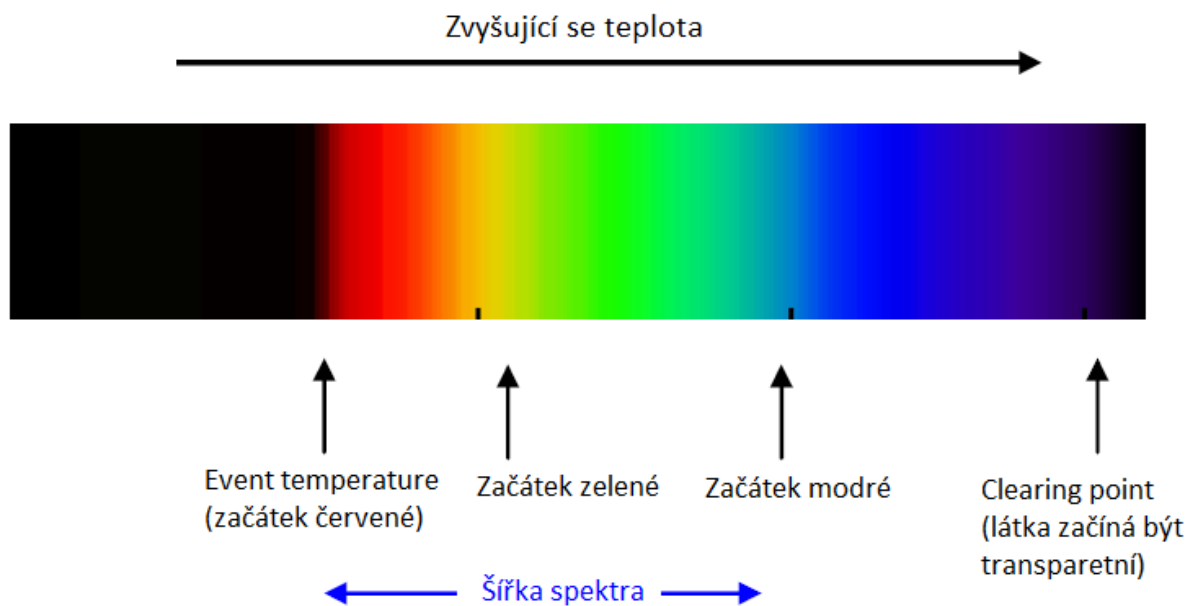
Jak již bylo zmíněno při popisu kalamitických kapalných krystalů chirálního charakteru, tak stoupání závitu je rozhodující pro určení, která vlnová délka bude odražena, a která naopak pohlcena. Stoupání tohoto závitu je závislé na volnosti molekul, a tudíž na jejich teplotě. Na Obr. 12 je znázorněn vztah mezi teplotou, stoupáním závitu a odraženou vlnovou délkou. Pokud jsou molekuly teplejší, což umožní jejich volnější pohyb, otáčení direktoru je větší a tím je menší stoupání závitu, které nakonec vyústí v odražení světla s kratší vlnovou délkou, jako je například modrá barva. Naopak studenější molekuly způsobí odražení světla s delší vlnovou délkou, jako je například červená barva. Tento jev jde bohužel proti přirozenému vnímání barev, kdy červená barva je vnímána jako teplejší než barva modrá. [6]



Obr. 12: Vliv teploty na stoupání závitu a na vlnovou délku odraženého světla [12]

Dopadající bílé světlo se po průchodu kapalným krystalem polarizuje a zároveň dochází k jeho interferenci se světlem odraženým z druhého konce krystalu a světlem na dopadající na povrch krystalu. Složky záření, které svoji polarizaci po průchodu kapalným krystalem otočily o úhly $k * \pi$, přičemž $k = 0, 1, 2 \dots$ tvoří interferenční maxima i minima v závislosti na fázovém posunu ϕ vzhledem k vlně, která se odrazila od povrchu. Záření o vlnové délce tvořící interferenční minima je pohlcováno, a naopak záření o vlnových délkách tvořící interferenční maxima je odráženo. [6]

V rámci optickými vlastnostmi termochromních kapalných krystalů je důležité poznamenat dvě kritické teploty. První kritická teplota (event temperature) určuje bod, od kterého začnou kapalné krystaly odrážet barvu. Pokud se látka nachází pod touto teplotou, tak se krystaly jeví jako transparentní. Po překročení druhé kritické teploty (clearing point temperature), dojde opět ke zprůhlednění látky, a to v důsledku jejího kompletního zkapalnění. Tyto teploty a jejich přibližné polohy na teplotní ose jsou graficky znázorněny na Obr. 13. Mezi další důležité parametry patří také šířka pásma, která nám udává interval teplot, na kterém dochází k odrazům jednotlivých barev. Šířka pásma začíná s červenou barvou a končí při dosažení barvy modré, viz Obr. 13. [16]



Obr. 13: Optické vlastnosti TLC v závislosti na teplotě [16]

Termochromatické kapalně krystaly (TLC - thermochromic liquid crystals) se běžně aplikují v kombinaci s černým pozadím a to z toho důvodu, aby světlo, které projde vrstvou kapalných krystalů, bylo co nejintenzivněji absorbováno a pokud možno minimálně interferovalo se světlem odraženým od TLC. [16]

4 Užívané formy termochromních kapalných krystalů

Termochromní kapalné krystaly se mohou vyskytovat ve více formách, přičemž každá je vhodná pro jiný druh aplikace.

Základní formy kapalných krystalů patří:

- a. Roztok nebo nezapouzdřená kapalina
- b. Mikrokapsle
- c. Tenká vrstva na nosiči

4.1 Roztok nebo nezapouzdřená kapalina

Kapalné krystaly ve formě roztoku či nezapouzdřené kapaliny mají olejovitou konzistenci, která v závislosti na teplotě může tihnout k pastě s nízkou viskozitou. Aplikace takovéto formy může probíhat pomocí nátěru, tisku, sítotisku, máčením nebo nástřikem. Pro požadovaný termochromní efekt se nejčastěji nanáší do tenké vrstvy, která má tloušťku 5 – 10 μm pro chirálně nematické kapalné krystaly a 50 μm a více pro kapalné krystaly na bázi cholesterolu. Jelikož se u takto tenkých vrstev jedná o relativně velkou plochu vůči svému objemu, je takováto struktura citlivá na UV záření a vnik vzdušného kyslíku a vlhkosti, organických rozpouštědel a tuků do své struktury. Tato změna ve struktuře může vyvolat změnu barevné odezvy materiálu na teplotu, a to již od velmi malých hladin (jednotky ppm) absorbovaného kyslíku, vlhkosti, organických rozpouštědel a tuků. Další problémy mohou způsobit například jemné prachové částice. [16]

Životnost kapalných krystalů v takovéto formě se může pohybovat v rozmezí hodin až dnů v závislosti na aplikaci a nepřízní okolního prostředí, jakému je struktura vystavena. Právě z důvodu omezené životnosti je použití kapalných krystalů ve formě nezapouzdřené kapaliny značně limitováno a prakticky vyloučeno pro komerční sektor, kde se očekává delší životnost než v řádu několika dnů. [16]

4.2 Mikro kapsle

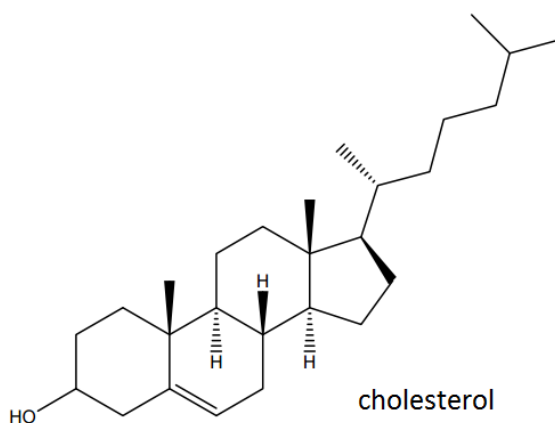
V současnosti představují kapalné krystaly zapouzdřené v mikrokapslých nejuniverzálnější řešení, jak zabránit jejich kontaktu s atmosférou, vlhkostí, UV záření a dalšími negativními faktory. Použitím mikrokapslí se navíc docílí snadné aplikovatelnosti na různé povrchy, které by jinak mohli strukturu kapalných krystalů narušit. [16]

4.3 Tenká vrstva na nosiči

Jedná se o roztok nebo mikrokapsle, které jsou nanesené v tenké vrstvě na substrát, který slouží jako nosič, ochrana a přestupní medium tepla pro aplikace, kdy by například z důvodu vysoké vlhkosti zkoumaného prostředí nebylo možné aplikovat kapalné krystaly napřímo. Nejčastějším nosičem je v takovémto případě polyethylenová folie. [16]

5 Příprava termochromních kapalných krystalů na bázi cholesterolu

Nejběžněji používaným typem kapalných krystalů využívaných pro termochromní aplikace jsou krystaly na bázi derivátů cholesterolu $C_{27}H_{46}O$, jehož strukturní vzorec je na Obr. 14. Konkrétně se jedná o chlorid cholesterolu $C_{27}H_{45}Cl$, cholesterol benzoát $C_{34}H_{50}O_2$, cholesterol pelargonát $C_{36}H_{62}O_2$ a cholesteryl oleyl karbonát $C_{46}H_{80}O_3$. Pomocí kombinace těchto jednotlivých látek můžeme připravit strukturu, která bude svým teplotním rozsahem a krokem vyhovovat konkrétním požadavkům pro danou situaci. Příklad konkrétních směsí s pro určitý teplotní rozsah je uvedený v Tab. 1.



Obr. 14: Molekula cholesterolu $C_{27}H_{46}O$ [18]

Tab. 1: Složení směsí kapalných krystalů pro různé teplotní intervaly [18]

Teplotní rozsah [°C]	cholesteryl oleyl karbonát [g]	cholesterol pelargonát [g]	cholesterol benzoát [g]
17-23	0,65	0,25	0,1
20-25	0,7	0,1	0,2
26,5-30,5	0,45	0,45	0,1
29-32	0,43	0,47	0,1
30-33	0,44	0,46	0,1
31-34	0,42	0,48	0,1
32-35	0,4	0,5	0,1
33-36	0,38	0,52	0,1
34-37	0,36	0,54	0,1
35-38	0,34	0,56	0,1
36-39	0,32	0,58	0,1
37-40	0,3	0,6	0,1

Tento výčet teplotních rozsahů neobsahuje zdaleka všechny dostupné možnosti a komerčně jsou již dostupné směsi s teplotním rozsahem od 20 °C do 120°C. [17]

Všechny výše zmíněné látky jsou dodávány ve formě prášku, které je v požadovaném poměru promíchán a poté nataven pomocí zvýšené teploty do tekutého stavu, ve kterém již setrvává. Tento proces je znázorněn na Obr. 15. Velkou výhodou těchto látek je také jejich netoxicitata a to jak pro člověka, tak i jiné organismy ať už živočišného či rostlinného původu. Tento fakt vede ke snadnější manipulaci, výrobě, skladování a případné likvidaci těchto produktů. [18]



Obr. 15: Příprava směsi CLC [18]

6 Experimentální ověření maximální přípustné teploty

Struktura kapalných krystalů je velice náchylná na podmínky, ve kterých je provozována. Jedna z těchto podmínek je i maximální teplota, kterou je struktura schopna vydržet bez změny svých vlastností. Tento údaj je velice důležitý jak při technologickém zpracování, tak i pro následné provozování takovéto struktury. Pro účely této práce jsme se rozhodli ověřit maximální přípustnou teplotu pro směs cholesterických kapalných krystalů SC100 od výrobce Hangzhou Color Rich Chem Co., Ltd., a to z toho důvodu, že tato směs nám bude sloužit i pro následné ověření možnosti využití krystalů pro mapování rozložení tepla na DPS. Z toho důvodu je užitečné získat elementární představu o teplotách, jenž může být směs vystavena. Použité kapalné krystaly jsou uzavřené v polymerových mikrokapslých a již od výrobce nanesené na substrátu z polyethylenové folie.

Experiment bude probíhat pomocí inkubátoru Friocell 66R od společnosti BMT a.s.. Tento inkubátor bude vždy přehříván na danou teplotu a poté do něj budou vloženy tři vzorky v podobě TLC na polyethylenovém substrátu. Doba setrvání vzorků na dané teplotě byla stanovena na 1 minutu, což představuje dostatečnou dobu pro provedení technologických operací jako je například laminování. Počáteční teplota testování je zvolena na 60 °C a krok testování byl zvolen 5 °C.

6.1 Výsledky měření maximální přípustné teploty

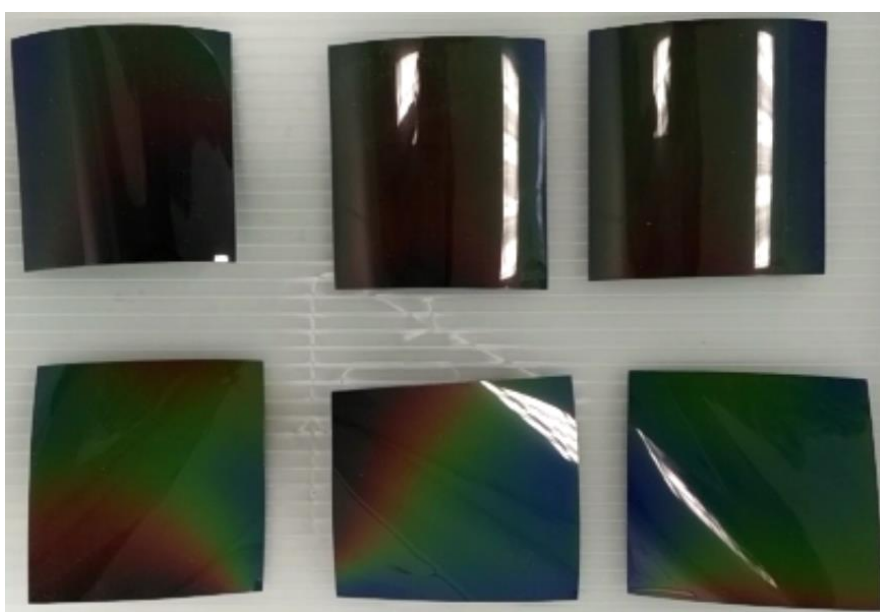
Výsledky měření maximální přípustné teploty byly rozděleny do intervalů a zaznamenány do Tab. 2. Obrázky k jednotlivým intervalům jsou uvedeny pod tabulkou a každý interval je reprezentován jedním snímkem, jelikož v rámci jednoho intervalu byly výsledky barevného vjemu totožné. Horní trojice vzorků jsou vzorky exponované dané teplotě a spodní trojice slouží jako referenční vzorky umožňující srovnání.

Tab. 2: Výsledky maximální přípustné teploty

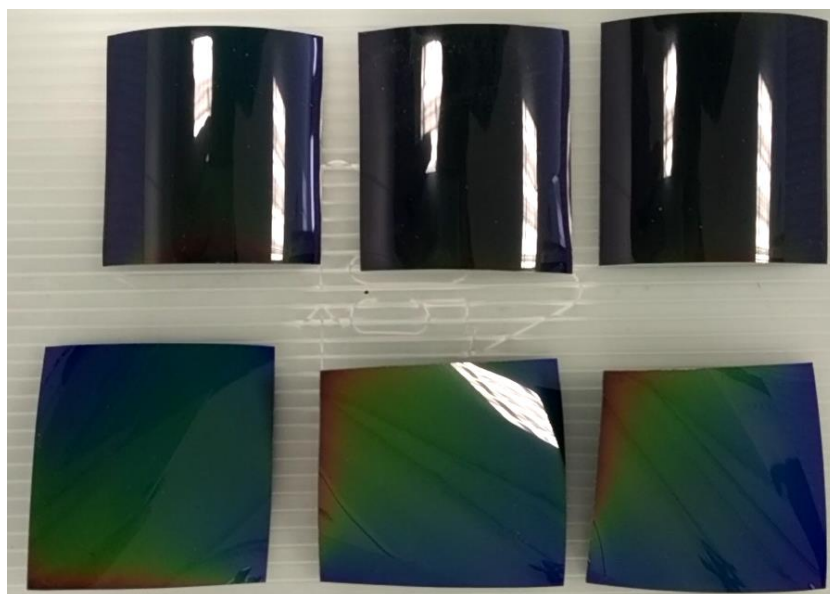
Teplota [°C]	Stav termochromní vrstvy	Číslo obrázku
60 až 70	Žádné zaznamenatebné prvky degradace	16
75 až 90	Ztráta sytosti barev v celém spektru	17
95	Dochází pouze k ostrému přechodu mezi modrou a červenou barvou	18
100	Vzorky vykazují pouze tmavě modrou barvu, po vychladnutí černou	19



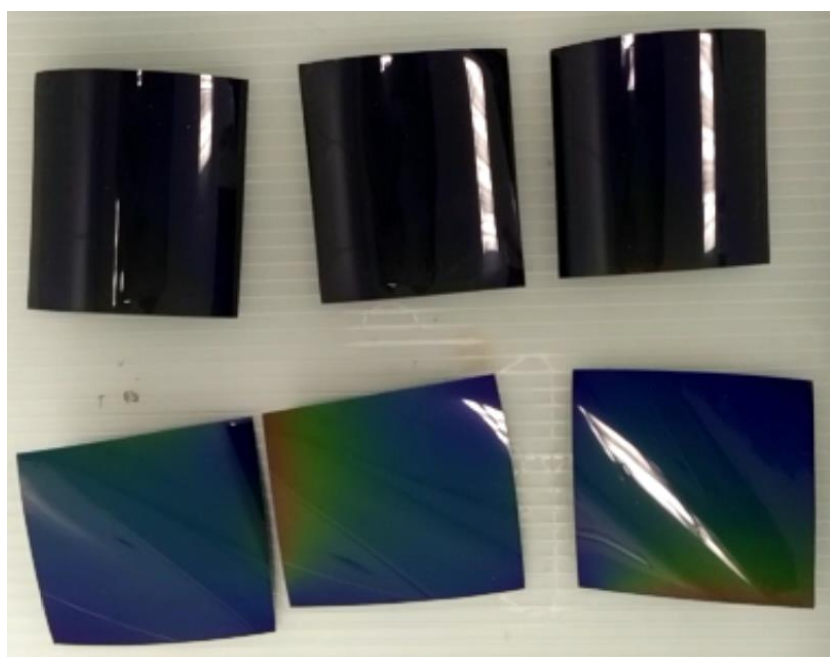
Obr. 16: Horní trojice vzorků byla exponována teplotě 60 °C až 70 °C



Obr. 17: Horní trojice vzorků byla exponována teplotě 75 °C až 90 °C



Obr. 18: Horní trojice vzorků byla exponována teplotě 95 °C



Obr. 19: Horní trojice vzorků byla exponována teplotě 100 °C

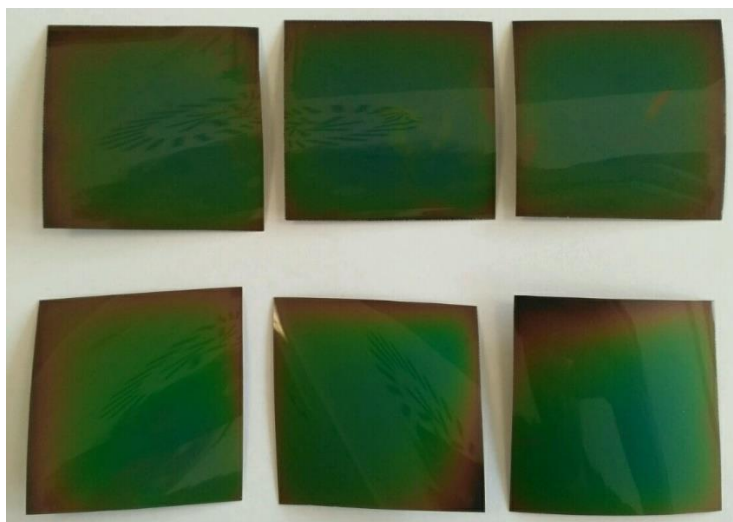
Výše uvedené poznatky nám dávají důležitou informaci o tom, že pokud nechceme ovlivnit barevnou odezvu termochromní vrstvy použitých cholesterických kapalných krystalů je důležité se vyhnout teplotám vyšším jak 70 °C. Další velmi důležitou teplotou se pro nás stala teplota 100 °C, jelikož tato teplota způsobila již nevratné poškození, které vedlo ke ztrátě téměř celého barevného rozsahu, a tudíž i použitelnosti dané látky SC100.

7 Experimentální ověření hysterezních vlastností

V tomto experimentu půjde o ověření, zdali cholesterické kapalné krystaly SC100 na polyethylenovém substrátu vykazují hysterezní charakter či nikoliv. Tato informace je velice důležitá z hlediska spolehlivosti měření teploty pomocí této technologie. Pokud by struktura kapalných krystalů vykazovala hysterezní charakter, bylo by nutné zjistit za jakých podmínek se tak děje a jak je možné tomuto předejít. Experiment bude probíhat pomocí teplotního inkubátoru Mammart UNB 200, kdy folie s kapalnými krystaly bude po dobu dvou měsíců vystavena konstantní teplotě 37 °C a následně bude zjištěno, zdali nedošlo k hystereznímu posunu termochromních vlastností těchto krystalů.

7.1 Výsledek testování hysterezního chování

Po uplynutí doby dvou měsíců byly vzorky vyndány z inkubátoru a byly porovnány s referenčními vzorky, které byly skladované při pokojové teplotě a vlhkosti. Při prohřívání exponovaných a referenčních vzorků na stejnou teplotu pomocí inkubátoru s termostatem nebylo pozorována změna v barevné odezvě na konkrétní teplotu a tudíž můžeme usuzovat, že námi použité kapalné krystaly SC100 nevykazují hysterezní charakter svých termochromních vlastností. Nicméně došlo k určitým změnám a to v sytosti barev exponovaných vzorků. Tato změna se projevila především u zelené a modré barvy, jak je vidět na Obr. 20. U ostatních barev byla tato změna sytosti barev zcela minimální. Tímto výsledkem jsme zároveň dostali informaci, v jaké míře námi vybrané TLC degradují při dlouhodobému vystavení zvýšené teplotě.



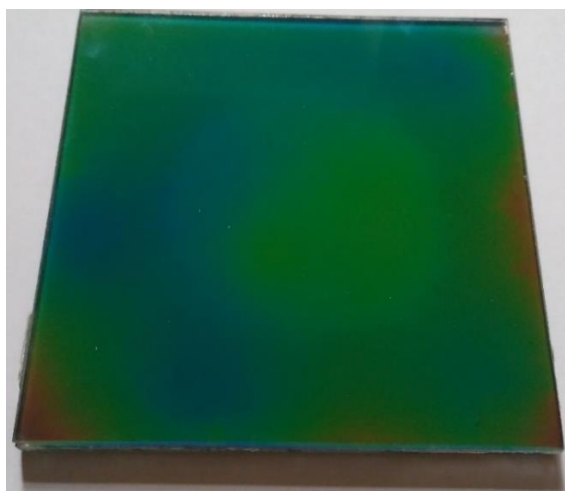
Obr. 20: Vzorky TLC po dvou měsících při 37 °C (nahore), referenční vzorky (dole)

8 Experimentální ověření rozlišovací schopnosti a měřicího rozsahu

Tento experiment je zaměřený především na ověření rozlišovací schopnosti a rozsahu vybraného termochromního materiálu pro účely měření teploty. Cílem tohoto experimentu je určit jaká barva bude dominantně odrážena od vzorku v konkrétních teplotních intervalech.

Pro testování byl vytvořen vzorek v podobě skelného laminátu, který slouží jako pouzdro pro námi pozorovanou vrstvu kapalných krystalů nanesených na polyethylenové folii. Výsledná podoba hotového vzorku je na Obr. 21. V experimentu bylo využito kapalných krystalů SC100, stejně jako v případě experimentů v kapitole 6 a 7. Tyto krystaly jsou na bázi cholesterolu a jsou zapouzdřeny do mikrokapslí z polymeru z důvodu jejich delší životnosti a ochrany před vnějším prostředím. Laminátu bylo využito především z důvodu tepelné kapacity skla, která zajišťovala určitou tepelnou setrvačnost, která výrazně měření zjednodušila. Tepelná kapacita samotné polyethylenové folie s vrstvou kapalných krystalů je natolik malá, že změny teploty (potažmo barvy) jsou okamžité a nebylo možné je jednoduše zaznamenat. Měřený vzorek má rozměry 10 x 10 x 0,6 cm.

Měření probíhalo ohřátím vzorku nad takzvaný *clearing point*, kdy kapalně krystaly vykazují čistě transparentní charakter a poté byl vzorek postupně ochlazován na pokojovou teplotu. Během chladnutí byly pomocí termokamery EasIR-9 (SN: 100213) pořízeny snímky pro určení teploty vzorku a zároveň byl pořízen snímek v klasickém viditelném spektru, aby mohlo dojít k porovnání mezi teplotou a barvou, kterou vzorek vykazuje.



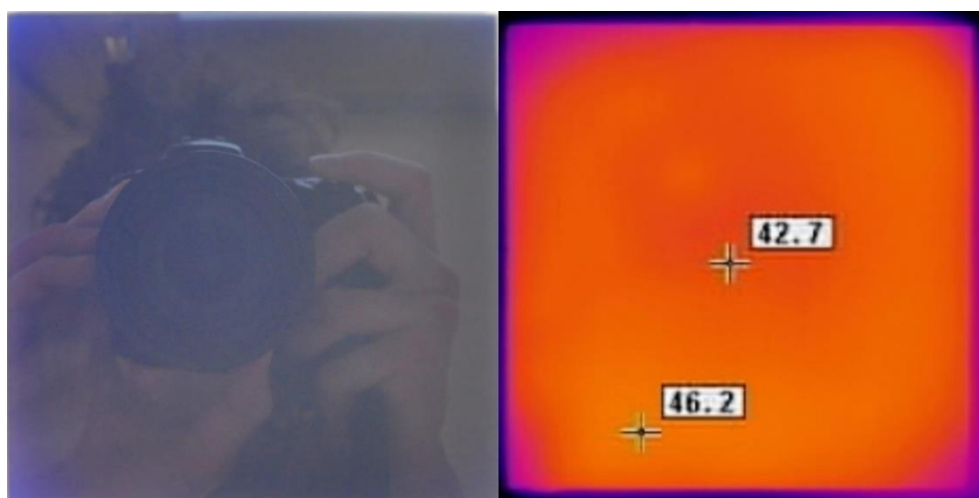
Obr. 21: Testovaný vzorek

8.1 Výsledky měření rozlišovací schopnosti a rozsahu pro měření teploty

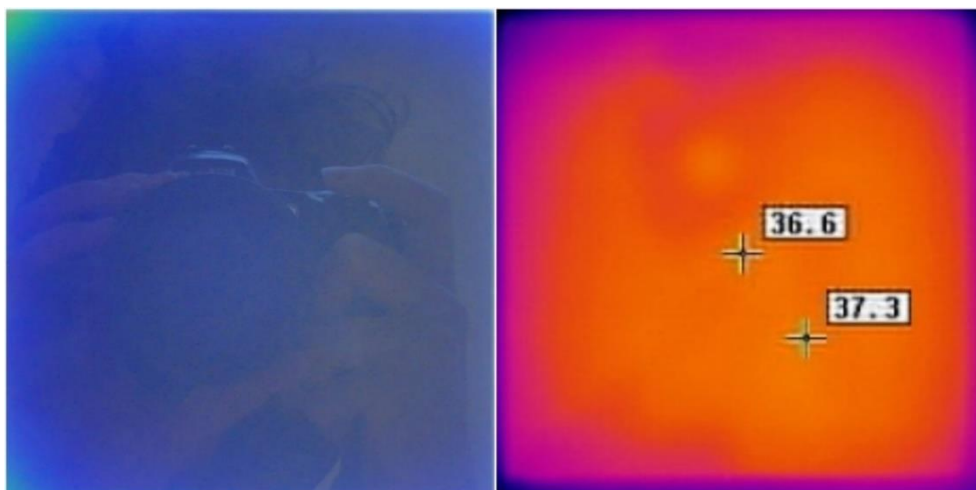
Výsledky měření jsou zobrazeny na Obr. 22 až Obr. 25. Vlevo je vždy obrázek z viditelného spektra vytvoření pomocí fotoaparátu Nikon D90 s objektivem Nikon 18-105. Napravo je obrázek vytvoření pomocí již zmiňované termokamery EasIR-9. Výstupem tohoto experimentu je zjištění, že *event temperature*, tedy teplota, kdy látka začíná odrážet specifickou barvu, je u námi zvolených krystalů SC100 26 °C a *clearing point*, tedy přechod do transparentní formy leží mírně nad teplotou 40 °C. Tudíž celkový rozsah využitelný pro měření teploty je 26 °C až 40 °C. Výsledky závislosti barvy vzorku na teplotě jsou shrnuty v Tab. 3.

Tab. 3: Výsledky z měření a zpracování na teplotní intervaly

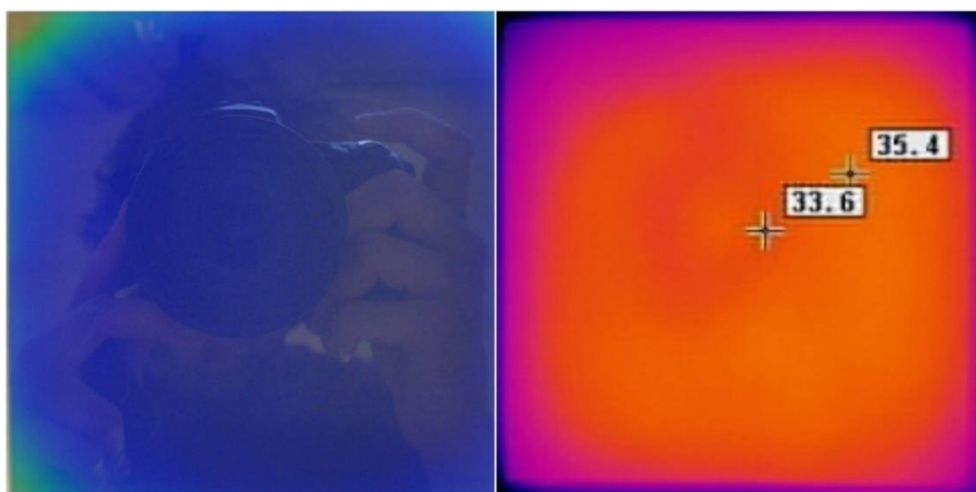
Rozsah teplot [°C]	Barva	Barva (HEX)
40 - více	Šeděmodrá	54566D
36 - 40	Enziánová modrá	39548B
34 - 36	Světle modrá	6676fD
32-34	Tyrkysová modrá	0CCED7
28-32	Zelenožlutá	67CB75
27-28	Béžová	B8C769
26-27	Ohnivě červená	D6653F
Méně - 26	Černá (barva podkladu)	---



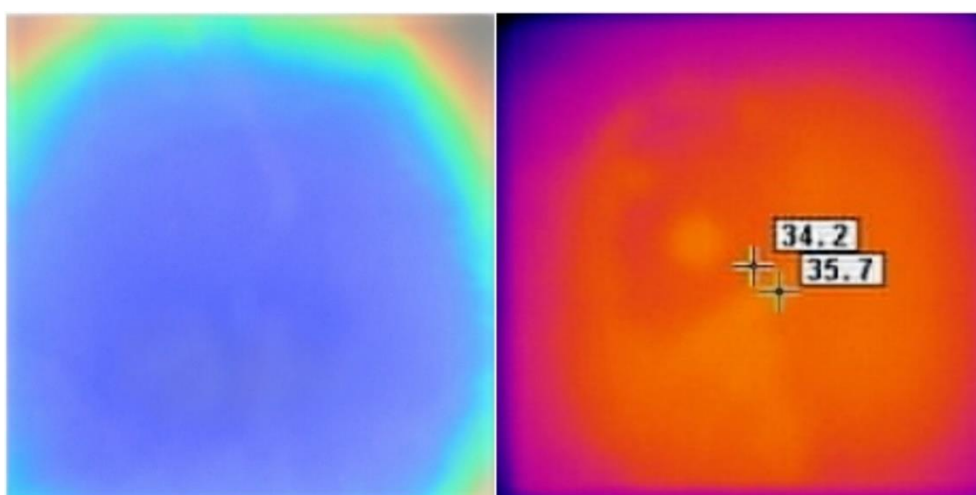
Obr. 22: Výsledek měření 1 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo



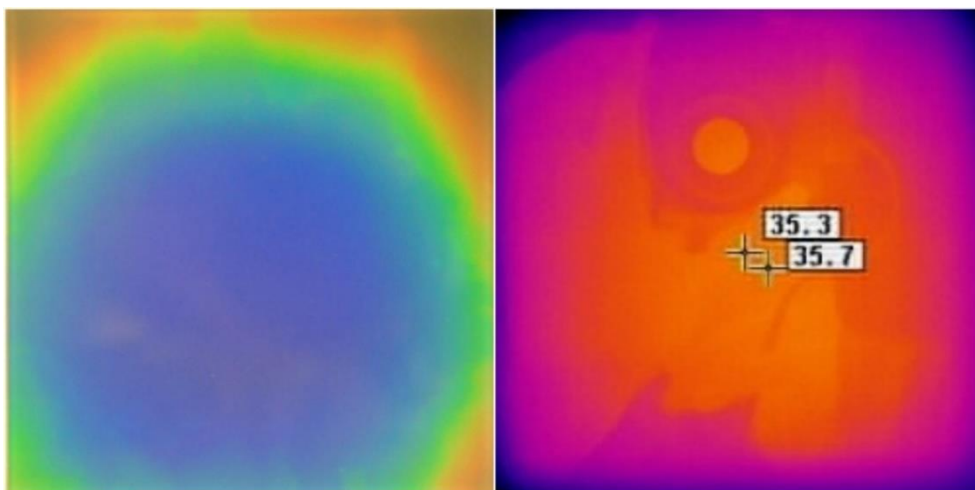
Obr. 23: Výsledek měření 2 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo



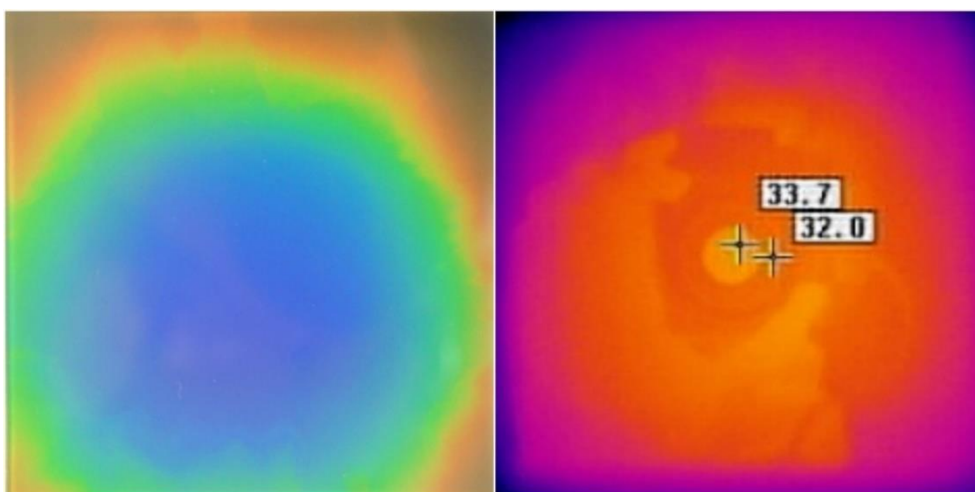
Obr. 24: Výsledek měření 3 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo



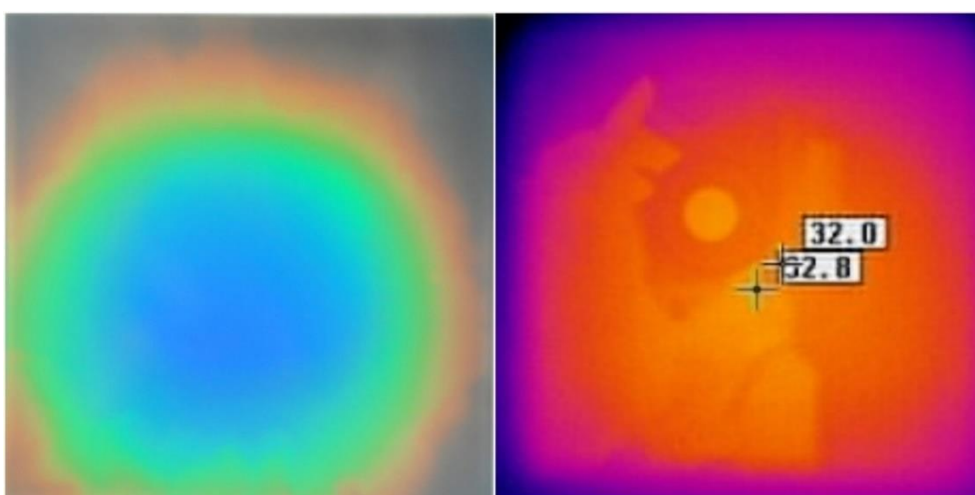
Obr. 25: Výsledek měření 4- viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo



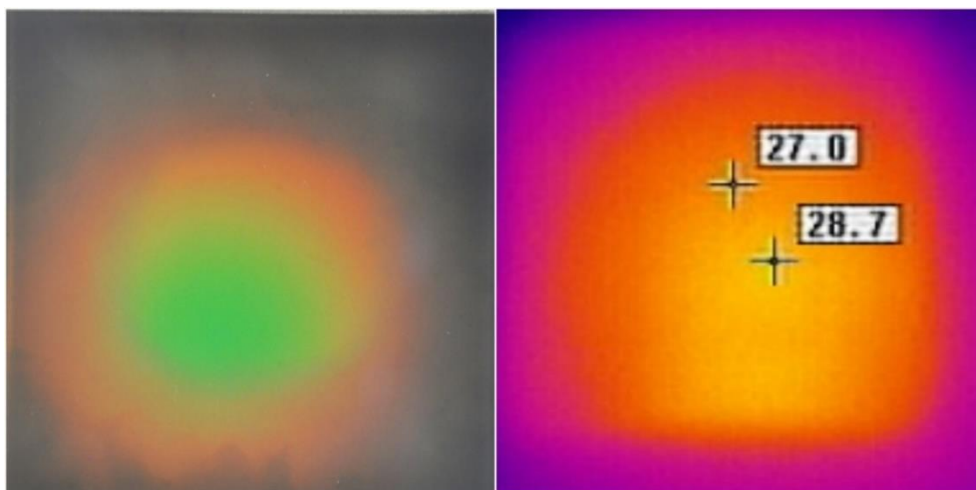
Obr. 26: Výsledek měření 5 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo



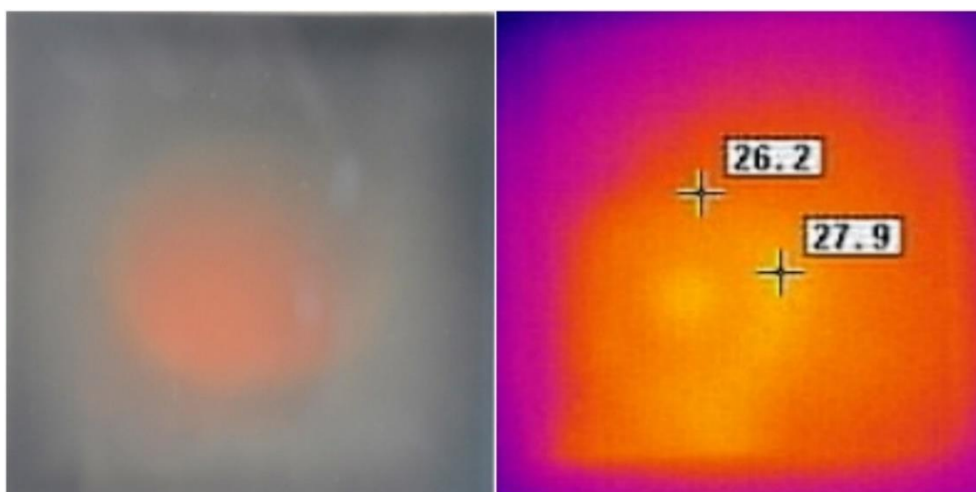
Obr. 27: Výsledek měření 6 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo



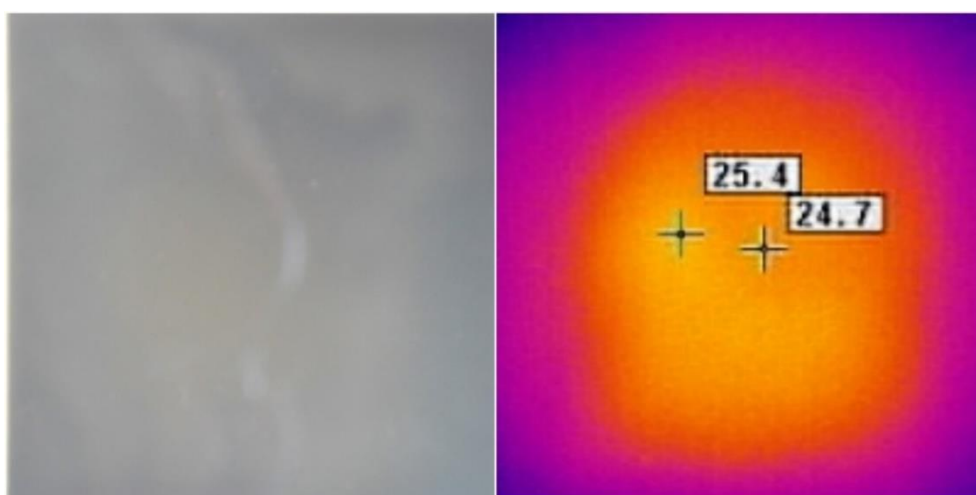
Obr. 28: Výsledek měření 7 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo



Obr. 29: Výsledek měření 8 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo



Obr. 30: Výsledek měření 9 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo



Obr. 31: Výsledek měření 10 - viditelné spektrum vlevo, IR spektrum vpravo

9 Experimentální ověření degradačních mechanismů

Při zpracování této práce docházelo k manipulaci s krystaly, které byly uskladněny po dobu více jak dvou let při pokojové teplotě a relativní vlhkosti do 60 % a při ověření jejich vlastností nebyla zjištěna žádná odchylka ve vlastnostech oproti krystalům zakoupených v době vypracování této práce. Z této zkušenosti vychází předpoklad autora této práce, že dlouhodobé skladování kapalných krystalů zapouzdřených v mikrokapslích z polymeru nepředstavuje závažný problém a takto uskladněné krystaly nepodléhají žádným výrazným degradačním pochodům. V této části práce bylo kladeno za cíl, ověřit schopnost kapalných krystalů, udržet si dlouhodobě své termochromní vlastnosti ve ztížených podmínkách. Tím získáme lepší přehled o možnosti reálného využití v průmyslových a spotřebních aplikacích.

Jelikož se jedná o velmi specifický druh materiálu, nebylo možné dohledat technickou normu či metrologický postup, který by tento materiál pokrýval z hlediska testování degradačních mechanismů. Z tohoto důvodu jsou níže uvedené testy individuálně navržené autorem této práce a vycházejí ze zkušeností vedoucího této práce. Testování bude probíhat za různých vnějších podmínek, a to konkrétně za zvýšené vlhkosti vzduchu, pomocí cyklických změn teploty, ponořením ve vodní lázni a ozařováním intenzivním UV zářením. Ověření degradace dlouhodobě zvýšenou teploty bylo již provedeno během testování hystereze.

9.1 Příprava a složení vzorků

Pro testování byla vyrobena sada vzorků, jejímž základním prvkem byla polyethylenová folie s tenkou vrstvou směsi kapalných krystalů SC100, se kterými jsme již pracovali v předchozích kapitolách.

9.1.1 Vzorek typu 1

Samostatná polyethylenová folie s kapalnými krystaly s rozměry čtverce o hraně 4 cm viz níže uvedený Obr. 32.



Obr. 32: Vzorek typu 1

9.1.2 Vzorek typu 2

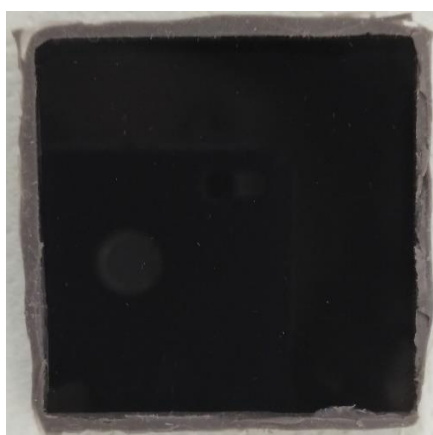
Vzorek typu 2 je laminát složený z folie s vrstvou TLC, skelného substrátu o tloušťce 2 mm a krycího sklíčka o tloušťce 2 mm. Tato struktura má zajistit větší odolnost vůči vlhku a zároveň ochranu před UV zářením, které je sodnovápenatým sklem silně absorbováno. [19] Vzorek je vyobrazený na Obr. 33.



Obr. 33: Vzorek typu 2

9.1.3 Vzorek typu 3

Jedná se o vzorek typu 2, jehož hrany byly utěsněny pomocí sanitárního silikonu Rako SI 123, viz Obr. 34. Toto opatření má zajistit vyšší odolnost vůči vlhkosti pronikající ze stran. Pro ověření, zdali kyselé prostředí tohoto silikonu nebude nijak ovlivňovat termochromní vlastnosti vzorku byl vytvořen prvotní vzorek, viz Obr. 35, na kterém byla po dobu tří měsíců pozorována stabilita jeho vlastností. Tímto testem se došlo k závěru, že daná silikonová hmota nemá negativní účinky na termochromní vlastnosti vzorku.



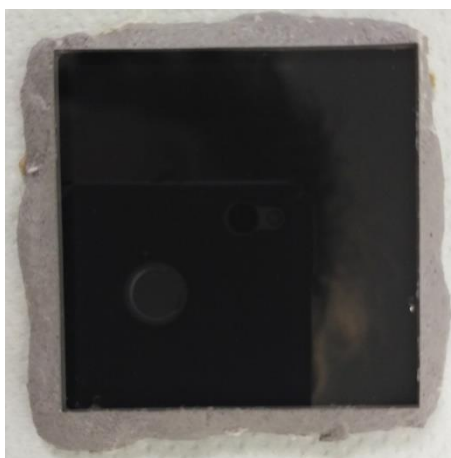
Obr. 34: Vzorek typu 3



Obr. 35: Test kompatibility vzorku a kyselého prostředí sanitárního silikonu

9.1.4 Vzorek typu 4

Základ opět tvoří vzorek typu 2, jehož hrany byly opět utěsněny pomocí epoxidové hmoty Rako GE 122, jenž má vynikat svojí chemickou stabilitou a vodotěsností. Hotový vzorek je zobrazen na Obr. 36. Stejně jako v případě silikonu byl vytvořen vzorek, viz Obr. 37, na kterém jsme po dobu tří měsíců pozorovali, zdali je daný epoxidový materiál kompatibilní se strukturou zalaminovaných kapalných krystalů. I v tomto případě jsme dospěli k závěru, že použití tohoto materiálu je pro utěsnění bočních stěn vhodné a nenarušuje termochromní vlastnosti vzorku.



Obr. 36: Vzorek typu 4



Obr. 37: Test kompatibility vzorku a epoxidové těsnicí hmoty

9.1.5 Ověření homogenity termochromních vlastností vzorků

Po dokončení přípravy všech potřebných vzorků došlo k ověření homogenity termochromních vlastností, a to jejich zahřátím na teplotu 40 °C a postupným chladnutím až na pokojovou teplotu viz Obr. 38. Ve spodní části můžeme vidět vzorky typu 1, které díky absenci skla mají výrazně nižší tepelnou kapacitu, a z toho důvodu je jejich barevná změna rychlejší. Tímto testem bylo ověřeno, že výchozí podmínky pro všechny testovací metody i vzorky jsou rovnocenné a porovnatelné.



Obr. 38: Kontrola homogenity termochromních vlastností vzorků

9.2 Testovací metody

Pro navození již výše zmíněných vnějších vlivů ve formě zvýšené vlhkosti vzduchu, cyklických změn teploty, ponoření ve vodní lázni a intenzivního UV záření budou využita zařízení jako exsikátor, teplotní inkubátor, vanička a výbojka s UV spektrem. Testování bude vždy probíhat za přítomnosti tří kusů od každého vzorku, aby se omezila pravděpodobnost náhodného selhání jednoho vzorku a tím falešně pozitivního či negativního výsledku.

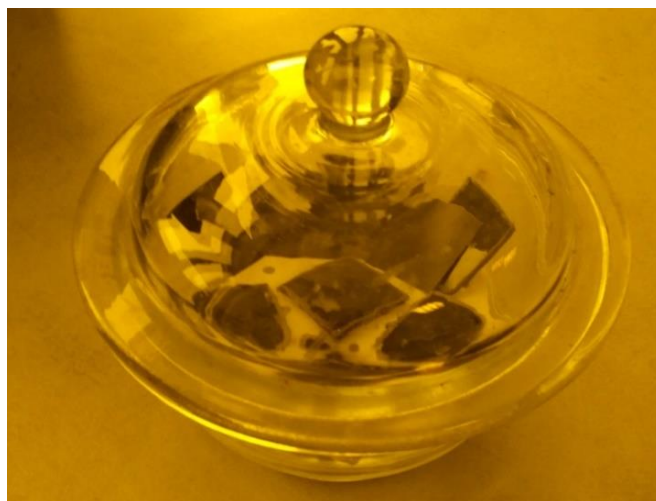
Pro zajištění objektivitu testování byly vytvořeny referenční vzorky, které budou uchovány při pokojové teplotě do 23 °C a relativní vlhkosti do 60 % pro případné porovnání s vzorky exponovanými testováním. Tím budete schopni odlišit, který defekt má příčinu v působení degradačního činitele, a který je součástí přirozeného degradačního mechanismu.

9.2.1 Zvýšená vlhkost vzduchu

Simulaci zvýšené vlhkosti vzduchu je možné zajistit pomocí exsikátoru, jehož spodní část je naplněna roztokem kuchyňské soli. Tento roztok následně udržuje relativní vlhkost vzduchu v horní části exsikátoru na předem známé hladině. Pro naše účely použijeme 10 % roztok NaCl (hmotnostní koncentrace), který při teplotě okolo 20 °C zajistí vlhkost vzduchu 93 %. [20] Spodní část našeho exsikátoru má objem přibližně 250 ml, a tudíž pro získání 10 % roztoku je potřeba 27,72 g NaCl, viz rovnice 1.

$$m_A = \frac{C_A \cdot m_R}{1 - C_A} = \frac{C_A \cdot (V_R \cdot \rho_R)}{1 - C_A} = \frac{0,1 \cdot (0,25 \cdot 998)}{1 - 0,1} = 27,72 \text{ g} \quad (1)$$

Vzorky jsou následně vloženy do horní části a exsikátoru. Samotný exsikátor je umístěný v místnosti, která je odstíněna od UV záření, abychom mohli vyloučit vliv tohoto činitele na dané vzorky. Provedení je znázorněno na Obr. 39. Tato zkouška je plánovaná jako zkouška dlouhodobého charakteru, a proto zvolený kontrolní interval je 120 hodin. Testování bude probíhat na všech typech vzorků po dobu 480 hodin.



Obr. 39: Exsikátor s vozenými vzorky a vlhkostí vzduchu 93 %

9.2.2 Ponoření ve vodní lázni

Předmětem tohoto testu je prověření odolnosti vzorků vůči vodě, a to při dlouhodobé expozici. Test bude probíhat na všech typech vzorků a pomocí nádoby s deionizovanou vodou. Nádoba bude skladovaná za teploty 23 °C. Kontrolní interval u této zkoušky je naplánován na 120 hodin.

9.2.3 Cyklické změny teploty

Tento test má ověřit odolnost termochromních vzorků vůči cyklickým změnám teploty. Pro navození těchto cyklických změn teploty bylo využito inkubátoru Friocell 66R od společnosti BMT a.s. Tento přístroj umožňuje cyklování s jasně nastavitelnými teplotami a dobou trvání horní a dolní hranice cyklu. Jelikož jsme v předchozím měření zabývajícím se teplotním rozlišením námi zvolených kapalných krystalů zjistili, že rozsah pracovních teplot je 26 °C až 40 °C, byly i hodnoty dolní a horní meze stanoveny na 26 °C a 40 °C. Přičemž setrvávání mezních teplotách bylo stanoveno na dobu 5 minut. Teplotní gradient při ohřevu a chlazení byl stanoven na 3 °C za minutu. Tato zkouška je plánována s dobrou trvání 120 hodin. Testovány budou vzorky typu 1, typu 2. Vzorky typu 3 a typu 4 se od typu 2 liší pouze izolací proti vlhkosti a z tohoto důvodu jsou při testu s cyklickými změnami teplot zbytečné.

9.2.4 Expozice intenzivnímu UV záření

Tento experiment si klade za úkol ověření stability termochromních vlastností při expozici intenzivnímu UV záření. Jelikož u tohoto testu nemá silikonové nebo epoxidové boční těsnění žádný význam, bude test probíhat pouze na vzorku typu 1 a vzorku typu 2, tedy samostatné polyethylenové folie s kapalnými krystaly a její zalaminovaná verze. Test bude probíhat pomocí svítidla PH135 (sériové číslo 20470) od firmy Labino AB s UVA výbojkou o výkonu 35W. Nejvyšší hodnota intenzity zářivého toku se nachází na vlnové délce 365 nm, tedy v oblasti ultrafialového záření typu A. [30] Tento typ záření má 95% podíl v UV záření dopadající na povrch země, přičemž zbylých 5% připadá převážně na ultrafialové záření typu B. [23] Výstupem tohoto testu by zároveň měla být představa, jak dlouho je možné nechat námi použitou termochromní strukturu na přímém slunečním záření, potažmo jaký efekt je možné od takové expozice očekávat. Z tohoto důvodu je potřeba určit množství energie, které obsahuje sluneční záření v ultrafialovém spektru na jeden metr čtvereční.

Vyjdeme z takzvané solární konstanty AM0, která udávající množství energie, jenž dopadá na horní vrstvy atmosféry. Hodnota této konstanty je 1366 W/m^2 . Nicméně průchodem atmosférou se část záření pohltí či odrazí, a proto se udává solární konstanta AM1.5, jejíž hodnota je přibližně 1000 W/m^2 . Tato hodnota se samozřejmě může lišit v konkrétních lokalitách, ať už na základě vzdálenosti od rovníku nebo samotnou polohou slunce vůči povrchu. [29]

Podle zdroje [31] jsou pouze 3 % této sluneční energie tvořené ultrafialový zářením, takže se zde dá hovořit o hodnotě přibližně 30 W/m^2 . Z produktového listu ke svítidlu PH135 [30] je možné vyčíst, že ve vzdálenosti 38 cm dodává výkon 50 mW/cm^2 tedy 500 W/m^2 . Pokud tedy v tomto případě budeme uvažovat lineární závislost mezi intenzitou expozice a mírou degradace, můžeme předpokládat, že degradace UV zářením z tohoto svítidla bude přibližně 17x rychlejší než pod přímým slunečním zářením. Jako komora pro umístění svítidla a vzorků byla použita stará PC skříň, která zajišťovala jasně definovaný prostor, na kterém záření bude působit. Kontrolní intervaly u této zkoušky jsou 72 hodin s celkovým počtem tří intervalů.

9.3 Průběh a výsledky testování

Testování probíhalo v individuálních časových intervalech pro jednotlivé testovací metody s ohledem na charakter a intenzitu zátěže. Aby bylo možné výsledky testování kvantifikovat, byl zvolen výpočet a vyjádření relativní míry degradace. Míra degradace vyjadřuje procentuální podíl plochy zasažené degradací k celkové ploše vzorku. Určení podílu zasažené a nezasazené plochy bylo provedeno pomocí softwaru Photoshop CS6, který vyjádřil počet pixelů obsažených v jednotlivých oblastech. Míra degradace je uváděna jako aritmetický průměr všech exponovaných vzorků stejného typu v daném intervalu a pro stejný degradační činitel. Obecný postup a konkrétní příklad výpočtu míry degradace je uveden níže v rovnicích 2 až 5. Čísla ve výpočtu jsou vztažena pro případ vzorku číslo 2 po 360 hodinách ponoření ve vodní lázni.

$$S_{D1} = 1 - \frac{px_{N1}}{px_{C1}} = 1 - \frac{275829}{1292688} = 0,7866 \quad (2)$$

$$S_{D2} = 1 - \frac{px_{N2}}{px_{C2}} = 1 - \frac{269184}{1262174} = 0,7867 \quad (3)$$

$$S_{D3} = 1 - \frac{px_{N3}}{px_{C3}} = 1 - \frac{296174}{1289918} = 0,7604 \quad (4)$$

$$\bar{S}_D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{Di} = \frac{S_{D1} + S_{D2} + S_{D3}}{n} = \frac{0,7866 + 0,7867 + 0,7604}{3} = 0,7779 \rightarrow 77,79 \% \quad (5)$$

9.3.1 Výsledky pro zvýšenou vlhkost vzduchu

V této části je záznam průběhu testování pomocí zvýšené vlhkosti vzduchu, a to vždy po určitém časovém intervalu. Po uplynutí tohoto časového intervalu byly vzorky zahřáty nad teplotu 40 °C a během následného chladnutí bylo pozorováno, zdali nedošlo ke změně jejich parametrů. K tomu byly paralelně pozorovány i referenční vzorky, které nebyly exponované zvýšené vlhkosti, aby bylo možné ověřit i případné posuny v barevném spektru či rychlosti odezvy.

120 hodin

Po prvních 120 hodinách testování byl na vzorku typu 1 pozorován defekt spočívající v přítomnosti „mrtvých bodů“. Tyto části vzorku ztratili své termochromní vlastnosti a navzdory změnám teploty zůstalo jejich zbarvení stejné. Tento jev byl pozorován na jednom ze tří vzorků typu 1 s určenou mírou degradace méně než 1 %. Vzhled těchto defektů je zachycen na Obr. 40.

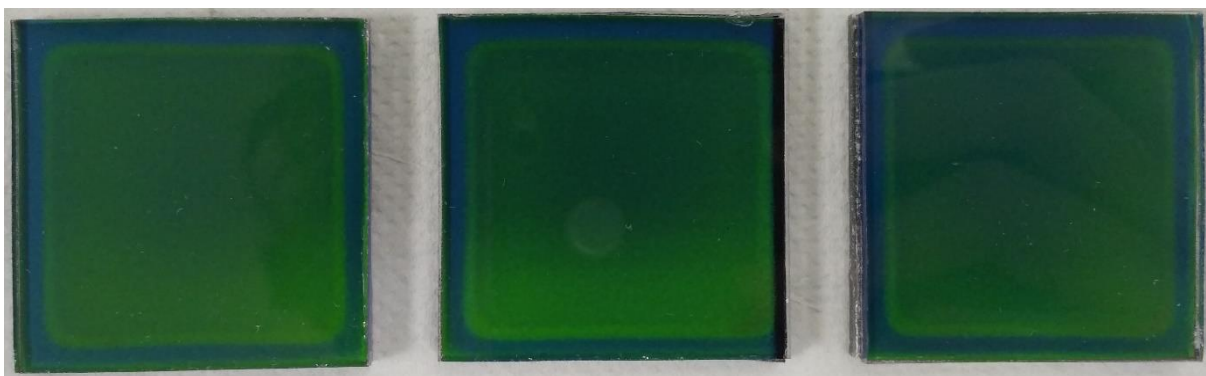


Obr. 40: Mrtvé body na vzorku typu 1 po 120 h v 93 % vlhkosti

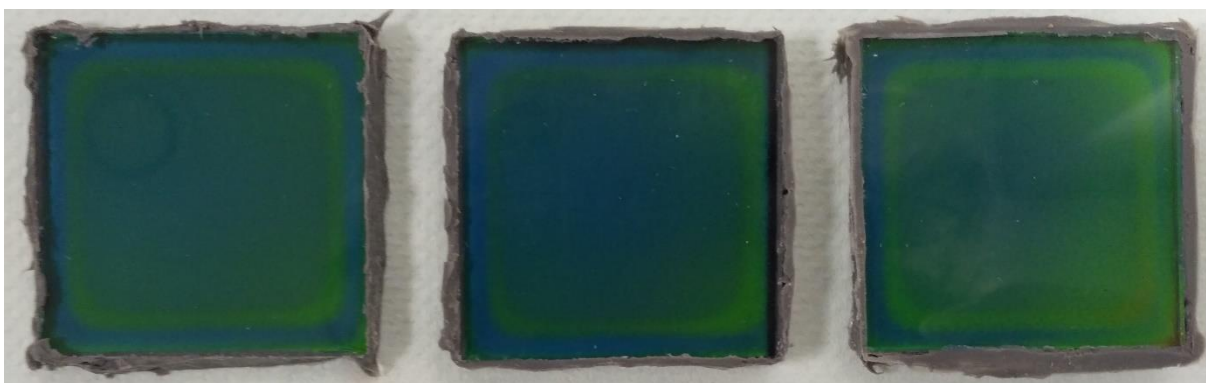
240 hodin

Po uplynutí 240 hodin bylo u vzorků typu 1 zaznamenány stejné degradační znaky jako tomu bylo po 120 hodinách. Konkrétně tedy mrtvé body, jež ztratily schopnost měnit barvu. Z hlediska míry degradace nedošlo k žádnému nebo velice nevýraznému posunu a vzorky typu 1 byly téměř identické stavu po 120 hodinách testování na Obr. 40.

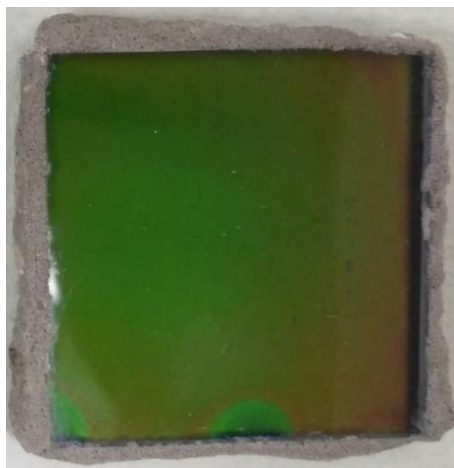
Výraznější posun nastal u vzorků typu 2 a typu 3. U vzorků typu 2 bylo možné pozorovat nástup změn barevné odezvy na danou teplotu, které je poměrně ostře ohraničeno. Vyšší míra degradace byla zaznamenána u vzorků typu 2 s hodnotou 27 %, což je pochopitelné díky absenci boční silikonové izolace viz Obr. 41. Vzorky typu 3 dopadly obdobně jako vzorky typu 2 s mírou degradace 30,2 %. Nicméně kontrast degradované a nezasažené části byl o něco menší, jak u vzorků typu 2 viz Obr. 42. Z těchto výsledků je jasné, že pro zvýšenou vlhkost není tato silikonová izolace vhodné řešení. Nejlépe dopadly vzorky typu 4, které se až na jeden vzorek obešli bez degradace. U daného vzorku došlo k průniku vlhkosti do laminátu, která byla ovšem způsobena chybou při výrobě vzorků. Vrstva epoxidové izolace nedosahovala celé tloušťky laminátu a na rozhraní skla a folie zůstala malá mezera umožňující průnik vlhkosti. Důsledek této chyby je vidět na Obr. 43 s mírou degradace dosahující 1 %.



Obr. 41: Vzorky typu 2 po 240 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO



Obr. 42: Vzorky typu 3 po 240 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO



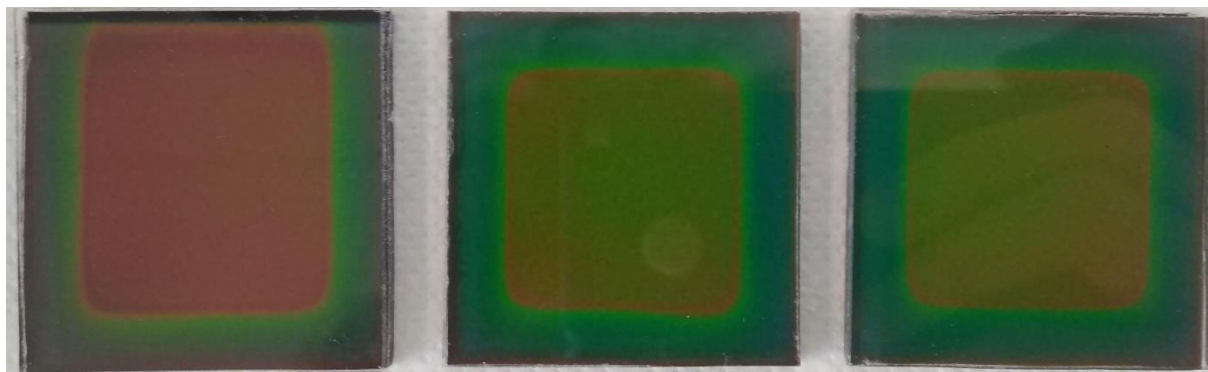
Obr. 43: Vzorek typu 4 po 240 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO

360 hodin

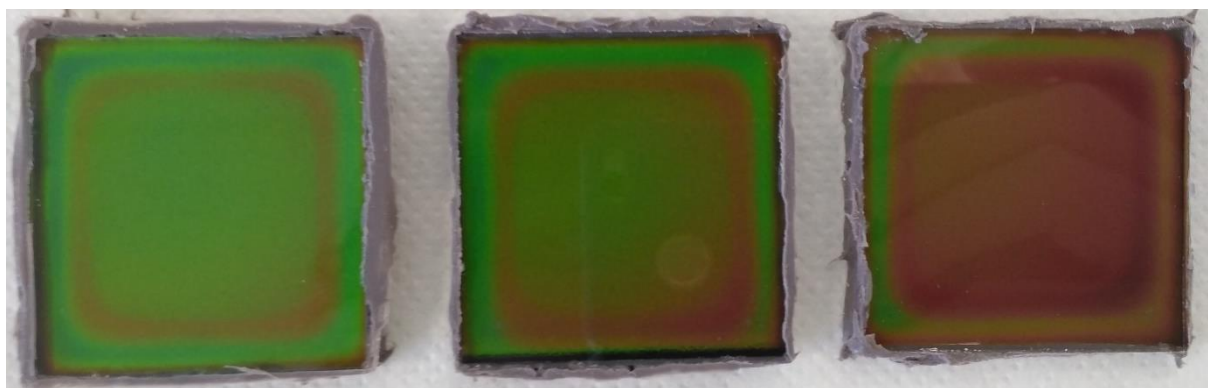
Po skončení třetího testovacího intervalu, tedy po 360 hodinách nebyl u vzorků typu 1 zaznamenán žádný posun v degradaci termochromní vrstvy oproti prvnímu a druhému testovacího intervalu. U vzorků typu 2 došlo k prohloubení degradace změny barevné odezvy na hodnotu 48,8 %, viz Obr. 44. V porovnání se záznamem po 240 hodinách je zde vidět jasný posun do hloubky vzorku, který pravděpodobně souvisí se postupující difuzí vlhkosti.

Zcela novou formu změny barevné odezvy jsme mohli pozorovat u vzorků typu 3. Jak je možné vidět na Obr. 45., tak také došlo posunu defektu směrem ke středu vzorku na celkovou hodnotu 52,7 % zasažené plochy. Nicméně se objevilo druhé ostré rozhraní, na kterém barevný vjem jiný než například ve středu vzorku. To, že se toto druhé rozhraní objevilo na vzorku typu 3 se silikonovou izolací, a nikoliv na vzorku typu 2 (bez izolace), nám dává najevo, že jev není čistě záležitostí přítomnosti samotné vlhkosti. Vysvětlení můžeme hledat v kyselém prostředí silikonu, které se sice při počátečním testování kompatibility se vzorkem neprojevovalo, ale při dlouhodobém působení vlhkosti se difundující vlhkost mohla projevit jako nosič kyselého prostředí. Jedná se pouze o teoretické vysvětlení tohoto jevu a přesnější zjištění příčiny by vyžadovalo další testy. Například vyrobení vzorku z lakmusového papírku a podstoupit stejný 360 hodinový testovací cyklus, aby bylo vidět jak hluboko a v jaké intenzitě se kyselost dostala do vzorku. V případě, že by vzdálenost odpovídala druhému rozhraní u našich vzorků, mohlo by to tuto teorii podpořit. U posledního typu vzorků typu 4 byla zaznamenán postup vlhkosti a jí způsobené znehodnocení na 4,3 % plochy vzorku. Problém nastal v místě, kde došlo ke špatnému vytvoření izolační vrstvy a na prostředním z trojice vzorků vyobrazených na Obr. 46. je v pravém horním rohu vidět, že i zde byla izolace oslabena a po 360 hodinách se to již začalo projevovat.

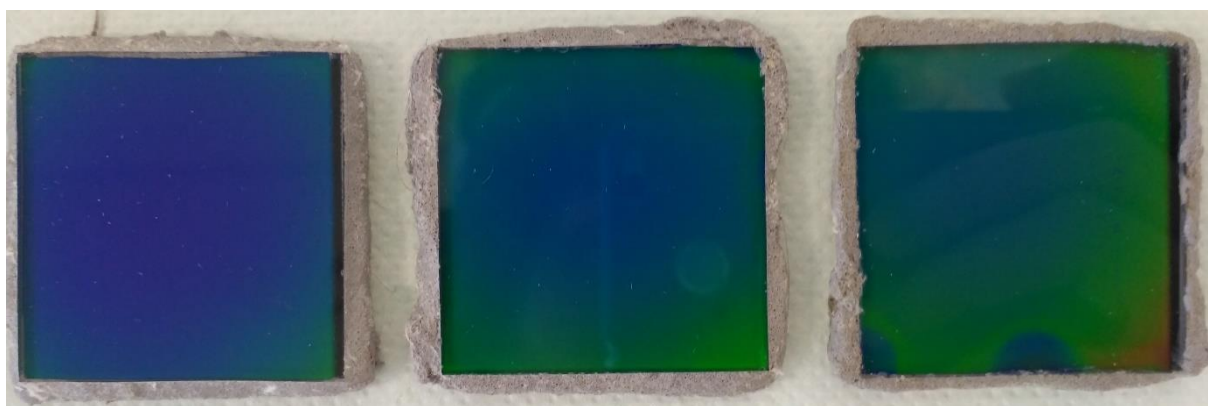
Ze současného pozorování můžeme říci, že epoxidová těsnicí hmota je vhodnou volbou, ale je zde velice důležité zajistit její kvalitní nanesení v dostatečné vrstvě a ta aby kryla celý průřez boční strany vzorku.



Obr. 44: Vzorky typu 2 po 360 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO



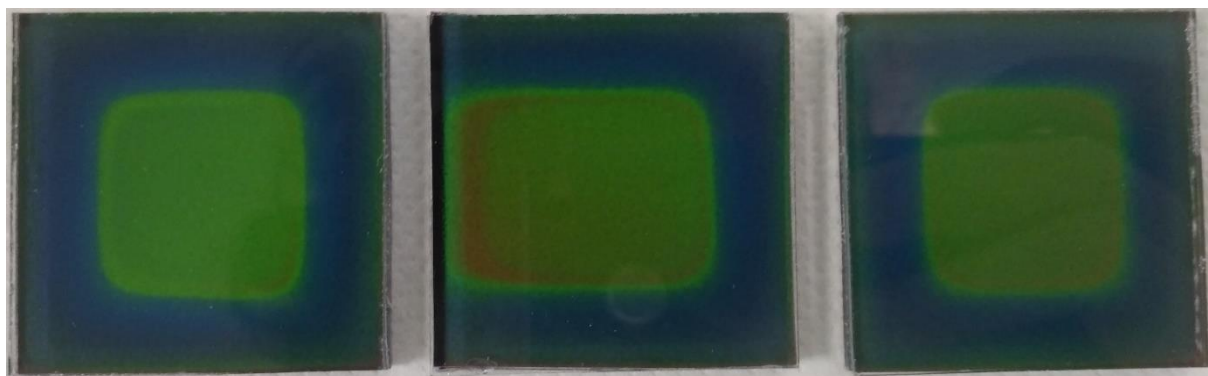
Obr. 45: Vzorky typu 3 po 360 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO2



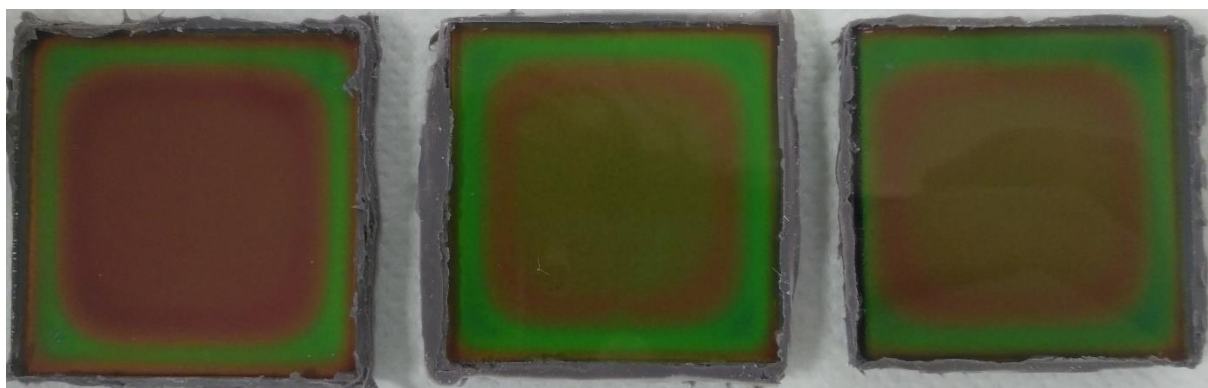
Obr. 46: Vzorky typu 4 po 360 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO

480 hodin

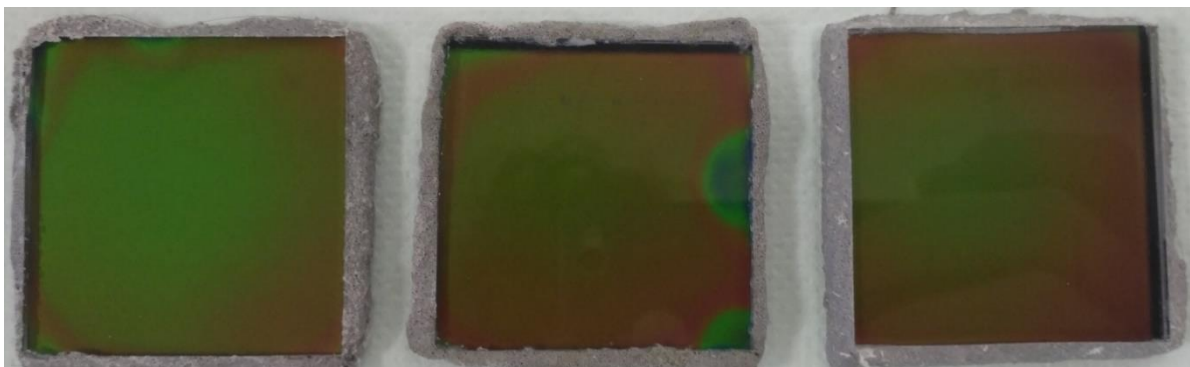
Na vzorcích typu 1 již potřetí nedošlo k žádné nebo velmi nevýrazné gradaci poškození. U vzorků typu 2 došlo opět k postupu deformace ke středu vzorku, viz Obr. 47 a celková úroveň poškození dosáhla 66 %. Nicméně rozdíl již nebyl tak výrazný, jak tomu bylo mezi záznamy po 120 a 240 hodinách, což napovídá tomu, že pro vlhkost je stále těžší dostat se skrz již exponované části vzorku. Navíc bylo u tohoto vzorku pozorováno blednutí na okrajích vzorků. Tento šedý “opar“ na okrajích vzorku bylo možné pozorovat nezávisle na teplotě, a to pod i pod “event temperature“, tedy teplotou, kdy jsou krystaly v transparentním uspořádání. Z toho můžeme usuzovat, že se nejedná přímo o poškození termochromních vlastností použitých kapalných krystalů, ale může se jednat o poškození struktury černé barvy, která slouží jako podklad. U vzorků typu 3 došlo pouze k mírnému postupu degradace na 60,5 % plochy vzorků a výsledky vzorků typu 3 po 480 hodinách jsou na Obr. 48. Poslední sledované vzorky jsou vzorky s epoxidovou izolační vrstvou, kde u dvou ze tří vzorků došlo k proniknutí vlhkosti skrz izolaci, a to vlivem její nerovnoměrné aplikace. Poškození vzorku není nijak výrazné, ale i tak nám dává jasnou zprávu o důležitosti správné aplikace izolace. Výsledky těchto vzorků jsou na Obr. 49.



Obr. 47: Vzorky typu 2 po 380 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO a blednutí barev na okraji



Obr. 48: Vzorky typu 3 po 480 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO2



Obr. 49: Vzorky typu 4 po 480 h v 93 % vlhkosti s defektem v podobě ZBO

Shrnutí výsledků pro degradaci pomocí zvýšené vlhkosti vzduchu 93 %

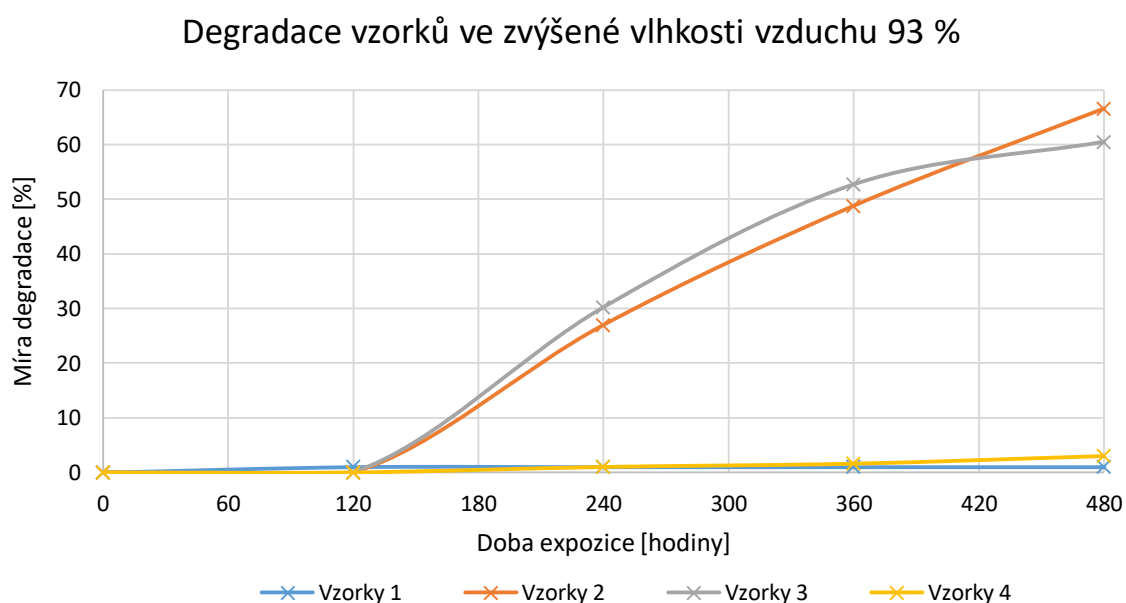
V níže uvedené tabulce a grafu je dostupné shrnutí kvantifikovaných výsledků měření degradace vzorků při 93 % relativní vlhkosti vzduchu. Z těchto dat je zřejmé, že pro vzorky tvořené skelným laminátem polyethylenové folie s kapalnými krystaly, je z testovaných možností nejlepší volba epoxidová izolační hmota Rako GE 122. Dále je grafu zřejmé, že rozdíl mezi vzorky se silikonovou izolací a bez izolace mají velice podobné výsledky, nicméně je třeba poznamenat, že tyto výsledky udávají pouze množství postižené plochy, ale při pohledu prozkoumání fotografií pro vzorky typu 2 a 3, tak je zřejmé, že intenzita poškození u vzorku bez silikonu byla vyšší, než u vzorku izolovaného. Co se týče vzorků typu 1, tak u nich byly zaznamenány pouze bodové poruchy, které ztratily své termochromní vlastnosti. Nicméně je zajímavým závěrem, že vzorky typu 1, které byly nejvíce obnažené působení vlhkosti, nakonec nevykazovaly změny v barevné odezvě na specifickou teplotu. Z toho vyplývá, že tento jev byl umocněný právě ochrannou vrstvou skelného laminátu, který pravděpodobně způsobil, že vlhkost, která do jeho struktury pronikla, již v této struktuře zůstala a mohla zapříčinit právě změny v barevné odezvě. Jako vysvětlení tohoto jevu se nabízelo, že přítomnost vlhkosti zvýšila tepelnou kapacitu, a proto zasažené části setrvávají v modré barvě déle než části nezasažené. Tuto teorii se ovšem podařilo vyvrátit jednoduše pomocí obrácení procesu, kdy jsme vzorky místo chlazení zahřívali a zjistili jsme, že rychlost odezvy do objevení první změny barvy je stejná jak v zasažené, tak nezasažené části, čím je jasné, že i tepelná kapacita těchto částí musí být stejná. Změna barevné odezvy musí tedy mít spojitost se změnou struktury kapalných krystalů.

Tab. 4: Shrnutí kvantifikovaných výsledků degradace při 93 % vlhkosti vzduchu

Činitel degradace	Zvýšená vlhkost vzduchu 93%			
Doba expozice	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4
120 hodin	MB, < 1%	0%	0%	0%
240 hodin	MB, < 1%	ZBO, 27%	ZBO, 30,2%	ZBO, 1%
360 hodin	MB, < 1%	ZBO, 48,8%	ZBO2, 52,7%	ZBO, 1,6%
480 hodin	MB, < 1%	ZBO, 66,6%	ZBO2, 60,5%	ZBO, 3%

Tab. 5: Legenda k Tab. 4

Zkratka	Slovní popis
%	Procenta v tabulce vyjadřují míru degradace plochy vzorku
MB	Mrtvé body - bodové poruchy, vykazující ztrátu termochromních vlastností
ZBO	Změna barevné odezvy - látka vykazuje jinou barvu pro stejnou teplotu
ZBO2	Změna barevné odezvy s více ostrými přechody



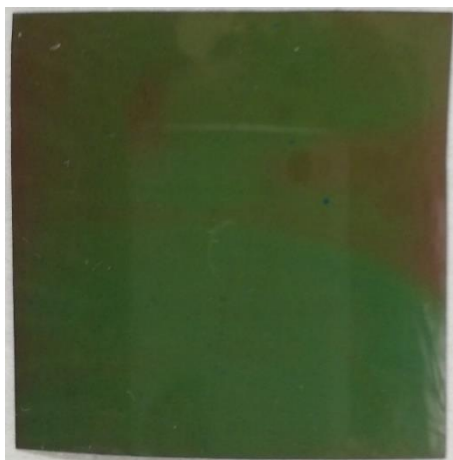
Graf 1: Degradace vzorků při relativní vlhkosti vzduchu 93 %

9.3.2 Výsledky pro ponoření ve vodní lázni

V této části je záznam průběhu testování vzorků pomocí ponoření ve vodní lázni, a to vždy po určitém časovém intervalu. Po uplynutí tohoto časového intervalu byly vzorky opět zahřáty nad teplotu 40 °C a během následného chladnutí bylo pozorováno, zdali nedošlo ke změně jejich parametrů. Paralelně byly pozorovány i referenční vzorky, které nebyly exponované zvýšené vlhkosti, aby bylo možné ověřit i případné posuny v barevném spektru či rychlosti odezvy.

120 hodin

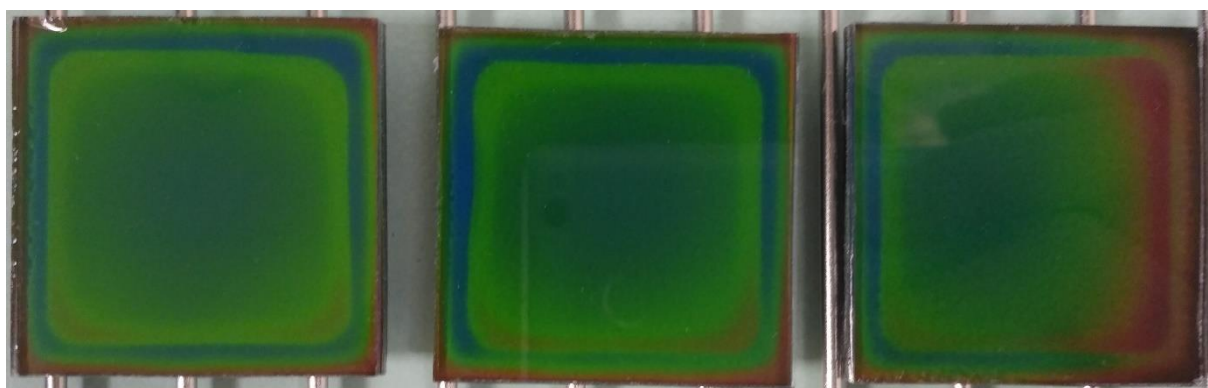
Po uplynutí prvního testovacího intervalu byl pozorován mírný defekt na jediném vzorku typu 1. Tento defekt spočíval v "mrtvém bodu", který ztratil své termochromní vlastnosti, jak je vidět na Obr. 50. Tento efekt byl pozorován pouze na jednom ze tří vzorků, a tudíž bude potřeba v následujících testovacích intervalech potvrdit či vyvrátit, zdali je defekt důsledkem ponoření ve vodě či se jedná o izolovaný případ mající svoji příčinu jinde.



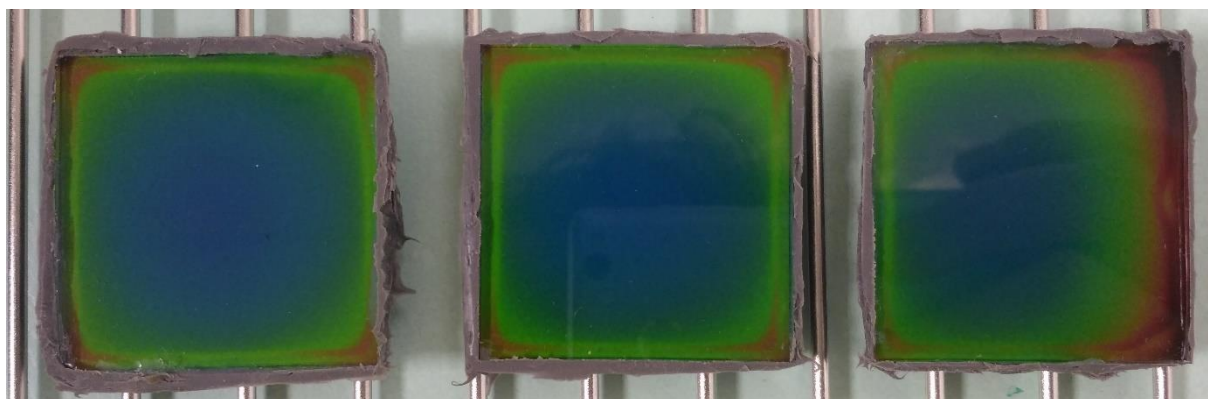
Obr. 50: Defekt "mrtvý bod" na vzorku typu 1 po 120 h ve vodní lázni

Druhým pozorovaným defektem byla změna barevné odezvy na konkrétní teplotu. Tento defekt se objevil u vzorků typu 1, typu 2 a typu 3. Defekt je zachycen na Obr. 51 a Obr. 52. Na prvním z této dvojice obrázků jsou vzorky typu 2 s mírou degradace 42,5 %, u kterých je jasně vidět, že po obvodu těchto vzorků se vytvořilo rozhraní, které při stejné teplotě vytvořilo jinou barevnou odezvu. Ostré rozhraní nám dává informaci o tom, že se jedná o změnu vlastností materiálu, a nikoliv o pouhý teplotní gradient, a to z důvodu, že skelný laminát takovéto skokové změny teploty neumožňuje.

Tento jev byl pozorovatelný i u vzorků typu 3, viz Obr. 52, zde ovšem díky vrstvě silikonu, který částečně zabránil pronikání vlhkosti do laminátu, bylo poškození pouhých 20 %. Nejlépe z této situace vzešli vzorky typu 4, kde nedošlo k žádné změně a můžeme tedy říci, že při ponoření je epoxidová hmota Rako GE 122 lepší pro utěsnění našich vzorků než varianta spoléhající na silikon Rako SI 123.



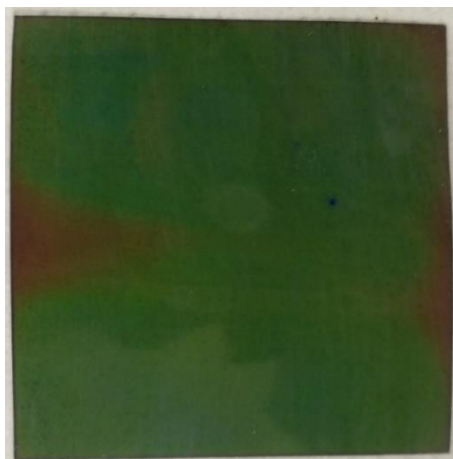
Obr. 51: Vzorky typu 2 po 120 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO



Obr. 52: Vzorky typu 3 po 120 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO

240 hodin

Po uplynutí 240 hodin, tedy ke konci druhého testovacího intervalu byl na dvojici vzorků typu 1 nalezen defekt v podobě „mrtvého bodu“, přičemž na vzorku z Obr. 54 byl tento jev nový a na vzorku z Obr. 53 došlo k rozšíření defektu, který byl pozorován již po prvních 120 hodinách. I tak míra degradace zůstala pod úrovní 1 %. Druhým významným defektem, který se projevoval u vzorků typu 1, bylo vyblednutí, respektive degradace sytosti barevného podání. Tento jev nastal u všech vzorků typu 1.

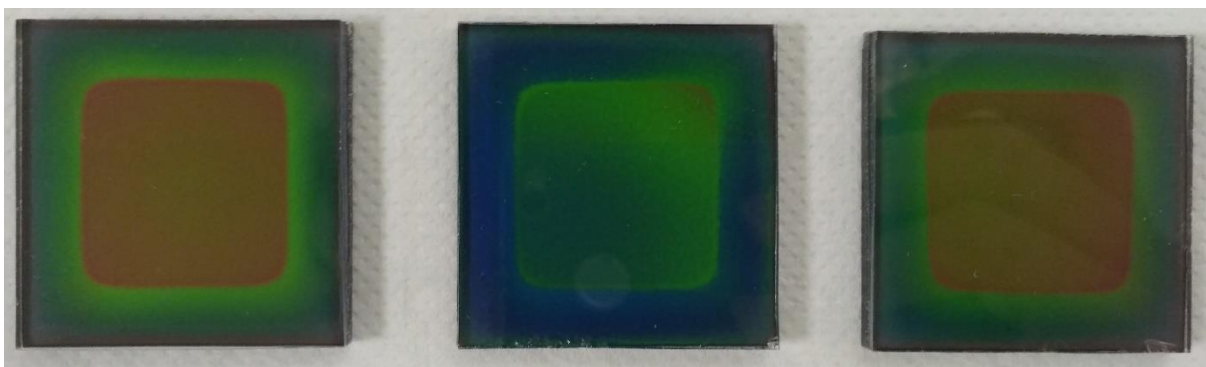


Obr. 53: Rozšíření defektu "mrtvý bod" na vzorku typu 1 po 240 h ve vodní lázni

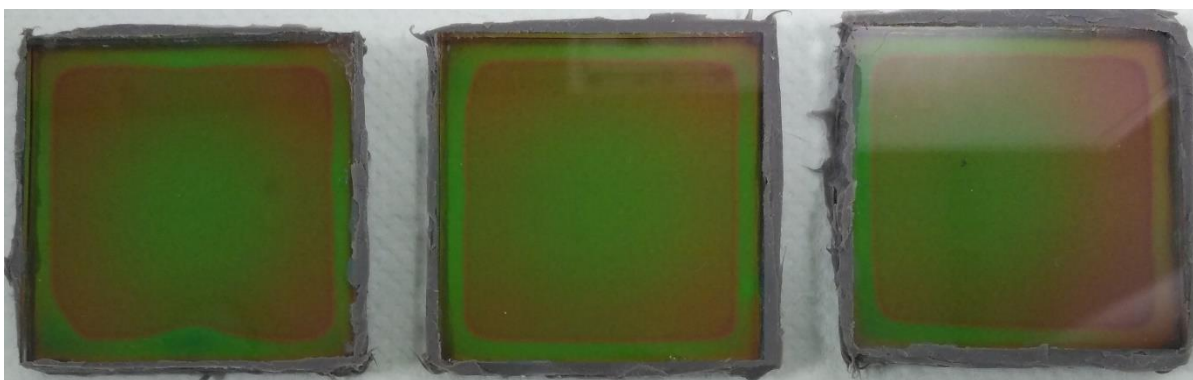


Obr. 54: Defekt "mrtvý bod" na vzorku typu 1 po 240 h ve vodní lázni

Dále byl opět pozorován defekt v podobě změny barevné odezvy na konkrétní teplotu. Tento defekt se objevil u vzorků typu 1, typu 2 a typu 3 a byl pozorován již po 120 h a s potupujícím časem došlo k jeho gradaci. Ta byla nejvíce znatelná na vzorku typu 2 s poškozením 62,1 % povrchu. Na Obr. 55 je dobře vidět, jak difuze vody postupuje ke středu vzorku. U vzorků typu 3 došlo též ke zhoršení, viz Obr. 56, a to na hodnotu 29,7 %, Pro vzorek typu 4 zůstala situace beze změny. Ani 240 hodinové ponoření nepředstavovalo pro epoxidovou izolaci žádný problém.



Obr. 55: Vzorky typu 2 po 240 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO

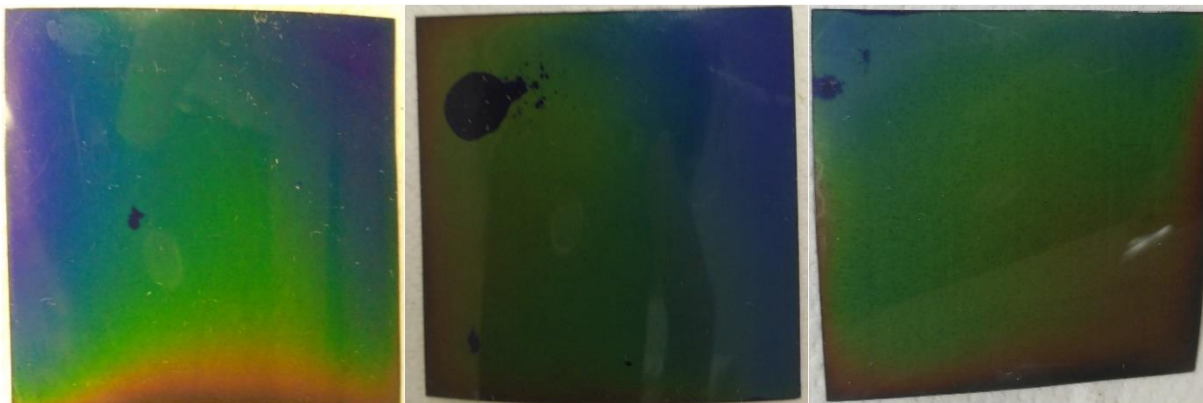


Obr. 56: Vzorky typu 3 po 240 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO

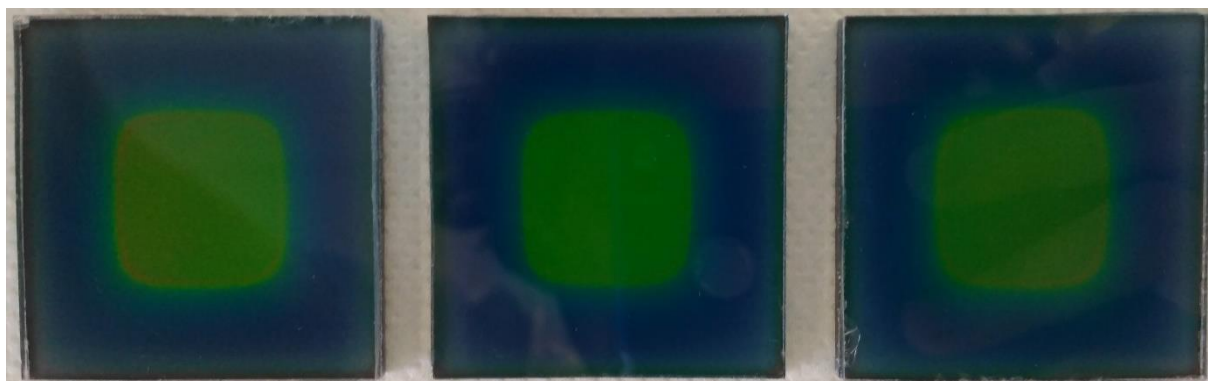
360 hodin

Na konci třetího testovacího intervalu bylo na vzorcích typu 1 pozorováno šíření již pozorovaného defektu v podobě “mrtvých bodů“, které již nevykazují termochromní vlastnosti. Míra poškození po 360 hodinách ve vodní lázni je 1,4 % a poškození postihlo již všechny vzorky, viz Obr. 57. U vzorků typu 2 můžeme opět pozorovat prostupování vody hlouběji do vzorku a s tím související postup již popsané degradace na 77,8 %. Navíc se na okrajích začala projevovat ztráta sytosti či blednutí barev, které bylo nezávislé na teplotě a projevovalo se i ve chvíli, kdy byly kapalně krystaly v transparentním stavu. Tudíž se dá předpokládat, že příčinu tohoto jevu je možné hledat jinde než ve vrstvě kapalných krystalů. Vzhledem k materiálovému složení vzorku se nabízí pouze varianta, že vlhkost potažmo voda reagovala s černou podkladovou barvou, přičemž došlo k její degradaci a z toho důvodu se okraje vzorků jeví v šedích odstínech. U vzorků typu 3 došlo opět ke zhoršení na viz Obr. 59, ale stejně jako tomu bylo na konci druhého intervalu je jasně vidět, že silikonová izolace značně zpomaluje pronikání vody do vnitřní struktury vzorku.

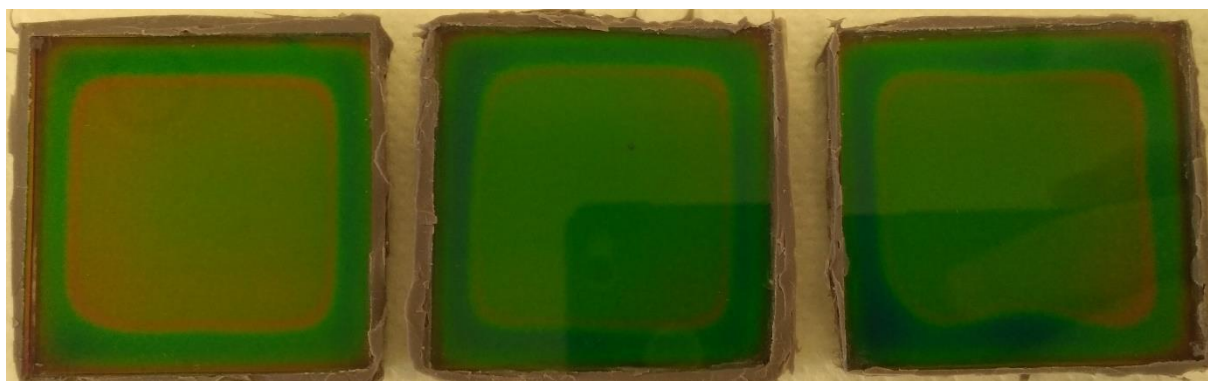
Vzorky typu 4 dosahovali opět nejlepších výsledků, ovšem u jednoho kusu došlo k proniknutí vlhkosti, viz Obr. 60. S tím byla spojena i lokální deformace termochromních vlastností, jak již bylo popsáno u ostatních vzorků. Míra deformace nepřesáhla 1 %.



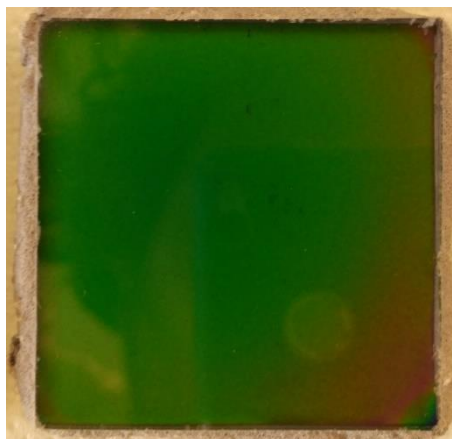
Obr. 57: Defekt "mrtvý bod" na vzorcích typu 1 po 360 h ve vodní lázni



Obr. 58: Vzorky typu 2 po 360 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO



Obr. 59: Vzorky typu 3 po 360 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO

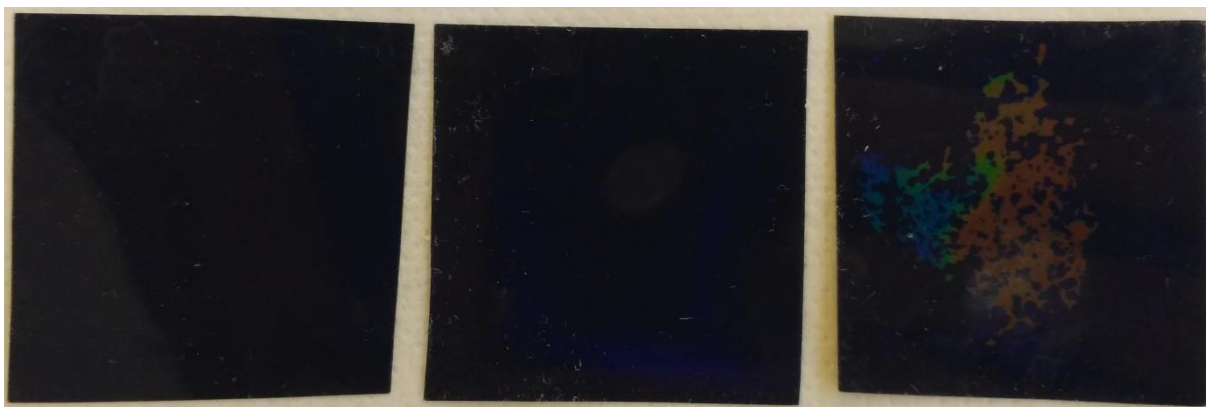


Obr. 60: Vzorek typu 4 po 360 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO

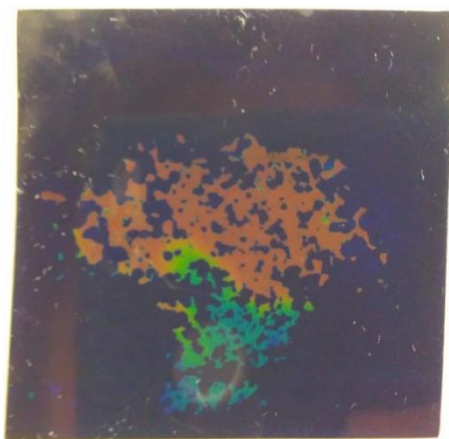
480 hodin

V pořadí čtvrtý testovací interval přinesl výrazné změny především u vzorků typu 1, kdy defekty v podobě lokálních “mrtvých bodů“ byly rozšířeny po celém povrchu vzorku a dva ze tří vzorků zcela ztratily své termochromní vlastnosti, viz Obr. 61. Třetí vzorek vykazoval termochromní vlastnosti pouze útržkovitě, viz Obr. 62. Celková míra degradace tedy dosáhla hodnoty 93,6 %. Tento jev je pravděpodobně způsobený rozpuštěním struktury kapalných krystalů do roztoku deionizované vody v kombinaci s narušením křehké struktury kapalných krystalů. Jelikož se na hladině vodní lázně vytvořil do té doby nepozorovaný tenký povlak, dá se předpokládat, že šlo právě o rozpuštěnou strukturu kapalných krystalů, která díky své nižší hustotě zůstala plovat na hladině nádoby. U vzorků typu 2 došlo pouze k dalšímu postupu vlhkosti do hloubky materiálu, čímž se posunula hranice ostrého přechodu, která je vidět na Obr. 63. a celková míra degradace dosáhla úrovně 89,1 %. Zároveň je čím dál tím výraznější ztráta sytosti barev na okrajích vzorku, tento jev byl popsán již v předchozím záznamu.

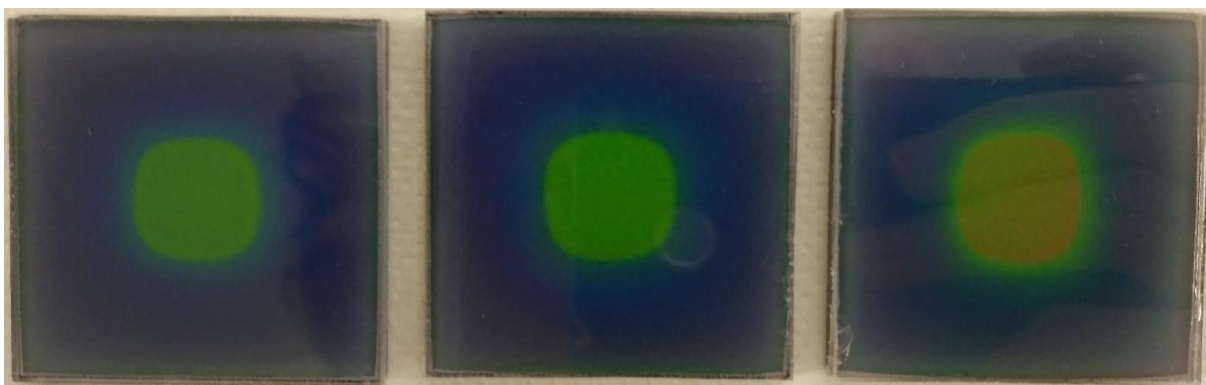
U vzorků typu 3 došlo prohloubení deformace na hodnotu 51,4 % a narostl i počet ostrých přechodů mezi jednotlivými barvami, a to až na pět rozhraní, viz Obr. 64. Nyní po 480 hodinách testování můžeme s větší jistotou tvrdit, že se opravdu jedná o jev, který má svoji souvislost se silikonovou izolací, jelikož u jiného druhu vzorků jsme nic takového nezaznamenali, a to ani u neizolovaného typu číslo 2 nebo lépe izolovaného typu číslo 3. Nejlepší výsledek byl již počtvrté zaznamenán u vzorků typu 4 a to s méně jak 1 % degradované plochy vzorku. I v případě vzorků typu 4 se ovšem našel jeden defekt, viz Obr. 65. Jednalo se o prohloubení problému, který se objevil již po 360 hodinách, a jak bylo výše poznamenáno, jednalo se o chybu při tvorbě daného vzorku, nikoliv o chybu ve vlastnostech epoxidu.



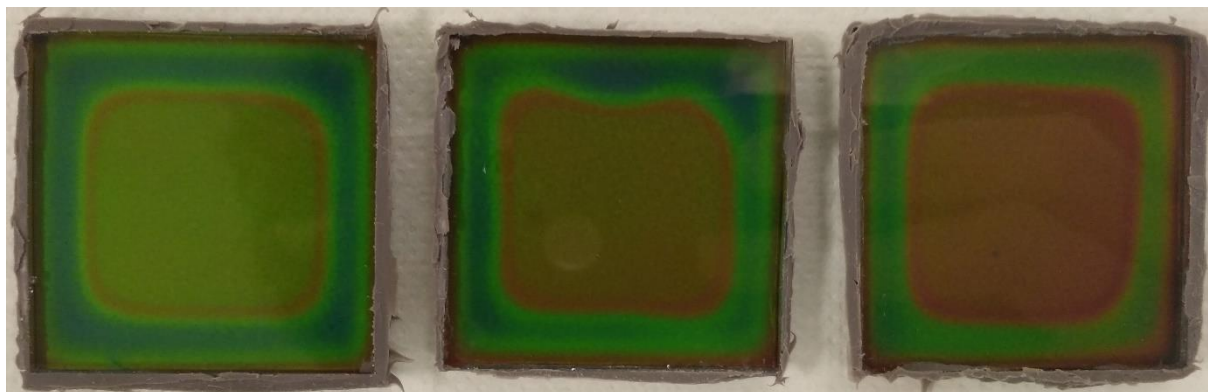
Obr. 61: Vzorky typu 1 po 480 h ve vodní lázni, levý a střední vzorek ztratil své termochromní vlastnosti a pravý vzorek je ztratil pouze částečně



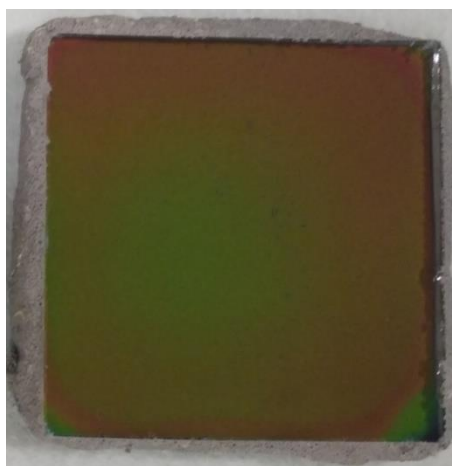
Obr. 62: Vzorek typu 1 po 480 h ve vodní lázni se ztrátou termochromních vlastností



Obr. 63: Vzorky typu 2 po 480 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO



Obr. 64: Vzorky typu 3 po 480 h ve vodní lázni s defektem v podobě ZBO



Obr. 65: Vzorek typu 4 po 480 h ve vodní lázni s defektem ZBO

Shrnutí výsledků pro degradaci pomocí ponoření ve vodní lázni

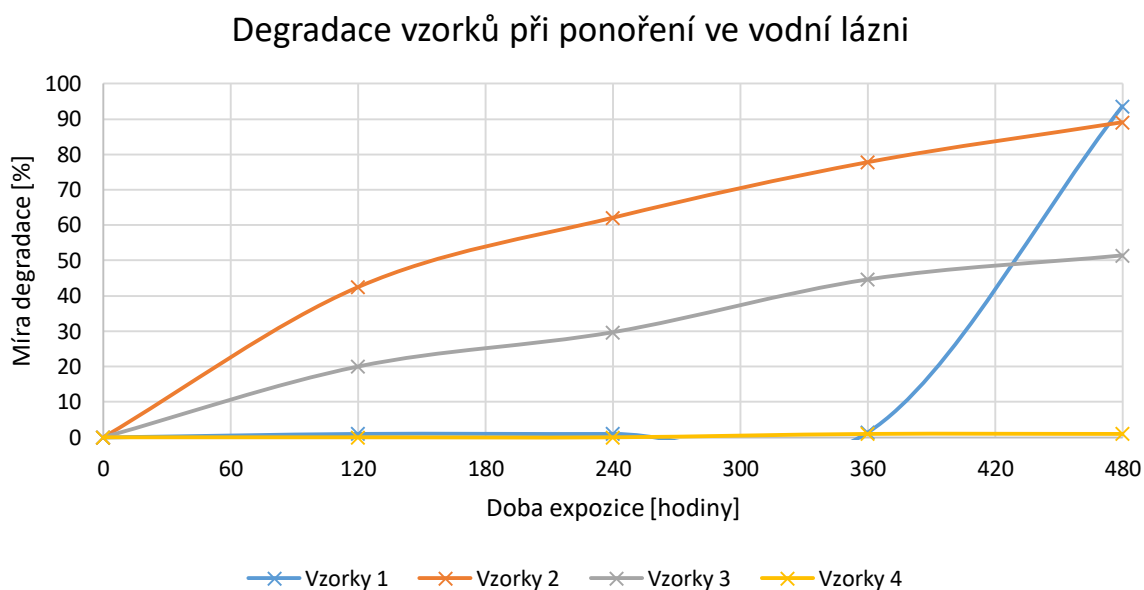
V níže uvedené tabulce a grafu je dostupné shrnutí kvantifikovaných výsledků měření degradace vzorků při ponoření ve vodní lázni. Velice zajímavý jev nastal během posledního testovacího intervalu u vzorku typu 1, kde došlo k prakticky k poškození celé termochromní vrstvy. Tento jev nastal velice nečekaně, protože v předchozích měřicích intervalech docházelo k poškození na úrovni jednotek desetin procenta. Ze vzorků ve skelném laminátu nejlépe dopadli vzorky typu 4, u nichž se první projevy degradace objevili až po 360 hodinách ponoření ve vodě, a i tak celková míra poškození nikdy nepřesáhla hodnotu 1 %. Výsledky jsou si sobě nejbližší vzorky typu 2 a 3, u kterých deformace stoupala téměř lineárně, přičemž u vzorků typu 2 je ostrost nástupu a celková deformace vyšší, a to přibližně o 20 % až 30 % v závislosti na testovacím intervalu.

Tab. 6: Shrnutí kvantifikovaných výsledků degradace při ponoření ve vodní lázni

Činitel degradace	Ponoření ve vodní lázni			
Doba expozice	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4
120 hodin	MB, < 1%	ZBO, 42,5%	ZBO, 20%	0%
240 hodin	MB, < 1%	ZBO, 62,1%	ZBO, 29,7%	0%
360 hodin	MB, 1,4%	ZBO, 77,8%	ZBO, 44,6%	ZBO, < 1%
480 hodin	MB, 93,6%	ZBO, 89,1%	ZBO2, 51,4%	ZBO, < 1%

Tab. 7: Legenda k Tab. 6

Zkratka	Slovní popis
%	Procenta v tabulce vyjadřují míru degradace plochy vzorku
MB	Mrtvé body - bodové poruchy, vykazující ztrátu termochromních vlastností
ZBO	Změna barevné odezvy - látka vykazuje jinou barvu pro stejnou teplotu
ZBO2	Změna barevné odezvy s více ostrými přechody



Graf 2: Degradace vzorků při ponoření ve vodní lázni

9.3.3 Výsledky pro cyklické změny teploty

Po 120 hodinách cyklických změn teploty nebyl na žádném vzorku pozorován jediný defekt ať už lokálního, či celoplošného charakteru jako například změna odezvy barevné odezvy na konkrétní teplotu či změna sytosti barev. Z tohoto můžeme usuzovat, že častá a rychlá změna teploty nepředstavuje pro námi testovanou strukturu žádný problém.

9.3.4 Výsledky expozice intenzivnímu UV záření

V této části je záznam průběhu testování vzorků pomocí intenzivního UV záření. Po uplynutí časového intervalu byly vzorky opět zahřáty nad teplotu 40 °C a během následného chladnutí bylo pozorováno, zdali nedošlo ke změně jejich parametrů. Paralelně byly pozorovány i referenční vzorky, které nebyly exponované UV záření, aby bylo možné ověřit i případné posuny v barevném spektru či rychlosti odezvy.

72 hodin

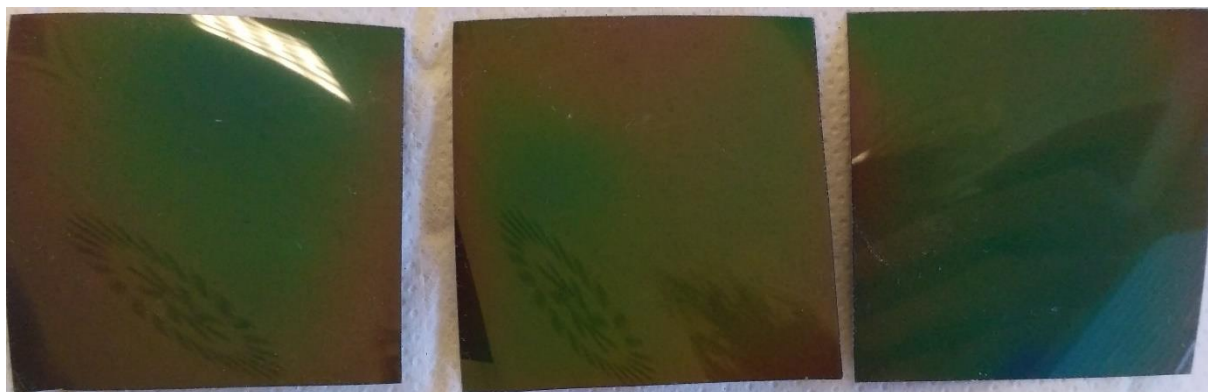
Po uplynutí prvního testovacího intervalu jsme u vzorků typu 1, které jsou na Obr. 66, mohli pozorovat mírné ztmavnutí barevných odstínů, barvy již nebyly tak intenzivní a přechod mezi béžovou, zelenožlutou a červenooranžovou barvou již nebyly tak jednoduše rozeznatelné. Na vzorcích typu 2 nedošlo k žádné změně. Je důležité poznamenat, že intenzita UV záření je přibližně 17x větší jak z běžného slunečního záření, a tudíž bychom tento stav na přímém slunečním záření mohli očekávat po 1224 hodinách, což odpovídá 51 dním kontinuálního osvitu.



Obr. 66: Vzorky typu 1 po 72 hodinách expozice UVA záření

144 hodin

Konec druhého intervalu přinesl na vzorku typu 1 změny v podobě mírného zkroucení nosné polyethylenové folie, jak je vidět na Obr. 67. To může být důsledek zvýšené teploty v testovací skříni. Dále se na těchto vzorcích začaly objevovat mírné trhlinky a shluky, jenž vykazují mírně odlišné vlastnosti ve své barvě. Vzorky typu 2 jsou nadále beze změn. Přepočet doby expozice na sluneční záření je pro tento interval 2448 hodin, tedy 102 dní.



Obr. 67: Vzorky typu 1 po 144 hodinách expozice UVA záření

216 hodin

Třetí a zároveň poslední testovací interval přinesl u vzorků typu 1 pouze prohloubení již pozorovaných deformací. Barvy daných vzorků nabyly tmavého odstínu a jak je vidět na Obr. 68, tak celý povrch vzorku je poset lokálními defekty, které mají jiné barevné vlastnosti. U vzorků typu 2 opět nedošlo k žádné změně a můžeme tedy poměrně s jistotou tvrdit, že krycí vrstva skla je schopna dostatečně odrazit či pohltit UVA záření, tak aby nedošlo k narušení termochromní vrstvy.



Obr. 68: Vzorky typu 1 po 216 hodinách expozice UVA záření

Shrnutí výsledků degradace expozicí intenzivnímu UV záření

Výsledky degradace po expozici UV zářením bylo zbytečné kvantifikovat, jelikož u vzorků typu 1 se poškození projevilo vždy rovnoměrně na celé ploše vzorku, a tudíž míra degradace byla vždy 100 %. Naopak u vzorků typu 2 nebyla v průběhu celého testu pozorována jediná změna ve vlastnostech, a tudíž míra degradace zůstala nulová. Z toho můžeme dospět k závěru, že sodnovápenaté sklo představuje účinnou ochranu proti UV záření. U vzorků typu 1 můžeme shrnout naše poznatky tím, že s kumulující se expozicí nechráněných vzorků docházelo postupně ke ztrátě sytosti barev a jejich tmavnutí.

10 Využití TLC pro mapování tepla na DPS

Jedním z cílů této práce je ověření praktického využití technologie termochromních kapalných krystalů pro účely diagnostiky tepelného návrhu desky plošného spoje a tepelného namáhání součástek. Za tímto účelem jsme opět využili cholesterické kapalně krystaly SC100 zapouzdřené v mikrokapslých z polymeru. U tohoto typu TLC jsme již experimentálně zjistili teplotní rozlišení, viz Tab. 3. Jejich teplotní rozsah 26 °C až 40 °C je pro náš experiment dostačující. Pro případné přesnější měření je možné připravit kapalně krystaly s mnohem užším rozsahem teplot, viz Tab. 1. Nicméně varianta s přípravou kapalných krystalů se specifickým teplotním rozsahem pro nás byla oproti zakoupení již hotové směsi ekonomicky příliš nákladná, a proto jsme zvolili zmiňovanou směs SC100.

10.1 Smáčení materiálů roztokem kapalných krystalů

Pro nanesení vrstvy kapalných krystalů je zásadní znalost jejich smáčení s daným materiálem. Díky tomu je pak možné zvolit optimální metodu nanášení a případné předúpravy povrchů. Smáčení povrchu do značné míry závisí na povrchovém napětí. Povrchové napětí je důsledkem kohezivních sil působících mezi jednotlivými částicemi kapaliny. Jejich podstatu je možné vysvětlit elektrostatickým přitahováním či odpuzováním molekul. Kohezivní síly mají pouze krátký dosah a jejich vliv klesá rychleji než s druhou mocninou vzdálenosti. Přitažlivé síly jednotlivých částic je tedy možné vymezit na velmi malý prostor, kdy tento kulovitý prostor nazýváme sférou molekulárního působení. V objemu kapaliny se dané silové působení vzájemně vyruší, nicméně na rozhraní kapaliny a jiného prostředí, se tyto síly projevují právě ve formě povrchového napětí. Chování povrchu kapaliny má poté charakter tenké pružné vrstvy, která se snaží zaujmout co nejmenší plochu při daném objemu kapaliny. Za situace, kdy by na kapalinu nepůsobila žádná vnější síla, by důsledkem povrchového napětí došlo k ustálení kapaliny ve tvaru koule, a to z toho důvodu, že tvar koule poskytuje nejmenší poměr mezi povrchem a objemem. Povrchové napětí je také definováno jako práce potřebná ke zvětšení plochy ke změně této plochy, tudíž můžeme říci, že je prakticky jedná o hustotu povrchové energie, viz rovnice 6. [22]

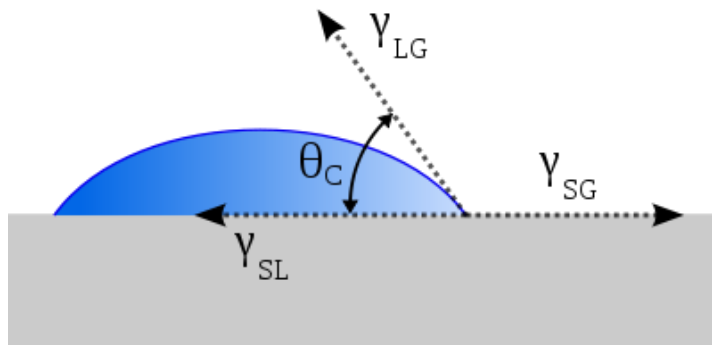
$$\sigma = \frac{\Delta E}{\Delta S} \quad (6)$$

Tuto definici lze převést na používanější tvar výpočtu povrchového napětí, a to jako síla, která je vztažena na délkovou jednotku řezu povrchu dané kapaliny, viz rovnice 7. [22]

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta l} \quad (7)$$

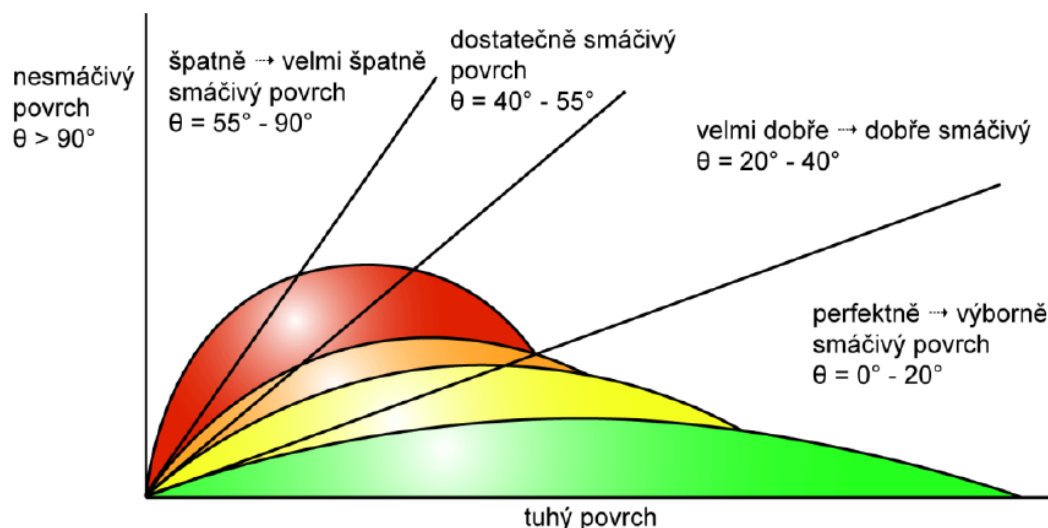
Kapalina v kontaktu s pevným povrchem zaujímá různé tvary, a to na základě povrchového napětí na rozhraní kapaliny a pevné látky, kapaliny a vzduchu (okolního prostředí) a také vzduchu a pevné látky. Tuto skutečnost popisuje Youngova rovnice (viz rovnice 8), jenž je graficky znázorněna na Obr. 69. Kde γ_{SG} je povrchové napětí mezi substrátem a vzduchem, γ_{LS} je povrchové napětí mezi kapalinou a substrátem, γ_{LG} je povrchové napětí mezi kapalinou a vzduchem a θ je smáčecí úhel. Z Youngovy rovnice, viz rovnice 8 a Obr. 69 je zřejmé, že čím menší bude povrchové napětí na rozhraní vzduchu a kapaliny, a naopak čím vyšší bude povrchové napětí mezi substrátem a vzduchem, tím k lepšímu smáčení dojde. [20]

$$\gamma_{SG} = \gamma_{LS} + \gamma_{LG} \cdot \cos \theta \quad (8)$$



Obr. 69: Vztah povrchového napětí a smáčecího úhlu dle Youngovy rovnice [28]

Youngova rovnice však nezohledňuje vliv gravitační síly na objem kapaliny, vliv drsnosti povrchu či jiné reakce mezi kapalinou a substrátem. Z těchto důvodů je dobré ověřit smáčivost dané kombinace materiálů ověřit experimentálně. Smáčení povrchu je tedy pro nanášení kapalného materiálu na materiál pevný zcela zásadní faktor a je pro nás důležité, aby se smáčecí úhel, pokud možno blížil 0° . Pokud by se jednalo o materiál, který má naopak zabránit adhezi dané kapaliny a pevné látky, bylo by potřeba smáčecího úhlu 180° a větší. Smáčivost povrchu můžeme rozdělit do několika intervalů, jak je to vyobrazeno na Obr. 70. [21]

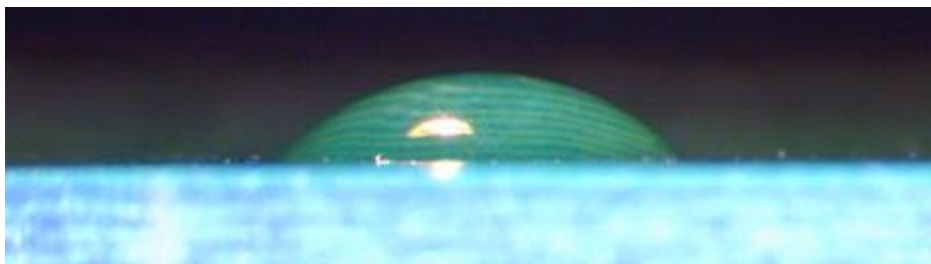


Obr. 70: Rozdělení smáčivosti povrchů podle velikosti smáčecího úhlu [21]

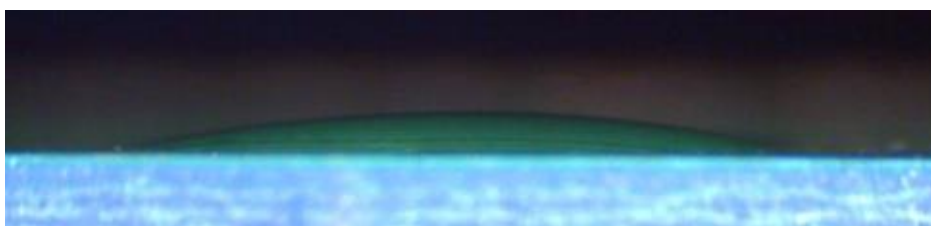
10.1.1 Porovnání smáčivosti

Jak bylo již výše zmíněno, tak smáčecí úhel je kritickým parametrem, z hlediska kvality nanášení kapalin na pevný povrch. Cíl této části je určit a porovnat smáčecí úhel deionizované vody, izopropylalkoholu a roztoku s kapalnými krystaly, a to na osazené desce plošného spoje materiálu FR4, což souvisí s ověřením využití kapalných krystalů pro testování tepelného návrhu desky prošlého spoje. Použitý substrát z materiálu FR4 byl předem očištěn pomocí izopropylalkoholu a následně vysušen, aby přítomnost izopropylalkoholu neovlivňovala smáčení.

První zkoumanou kapalinou byla deionizovaná voda, která dosahovala poměrně velkého smáčecího úhlu 42° viz Obr. 71, což by již pro dobré nanášení vyžadovalo úpravy povrchu, které by zajistilo lepší smáčivost. Například pomocí několikasekundového vystavení CO_2 OAUGDP plasmě. Druhou testovanou kapalinou byl izopropylalkohol, u něhož hodnota smáčecího úhlu dosahovala příznivé hodnoty 13° , viz Obr. 72. Pro tuto kapalinu by nebylo potřeba zavádět žádné zvláštní opatření pro zlepšení smáčivosti povrchu. Posledním a nejdůležitějším vzorkem v tomto porovnání byl roztok s kapalnými krystaly SC100. Hodnota smáčecího úhlu pro tento roztok byla naměřena 23° , což je stále na hranici mezi perfektní a velmi dobrou smáčivostí. Z tohoto porovnání je možné si udělat určitou představu o možnostech nanášení roztoku s kapalnými krystaly.



Obr. 71: Smáčecí úhel 42° pro deionizovanou vodu na materiálu FR4



Obr. 72: Smáčecí úhel 13° pro izopropylalkohol na materiálu FR4

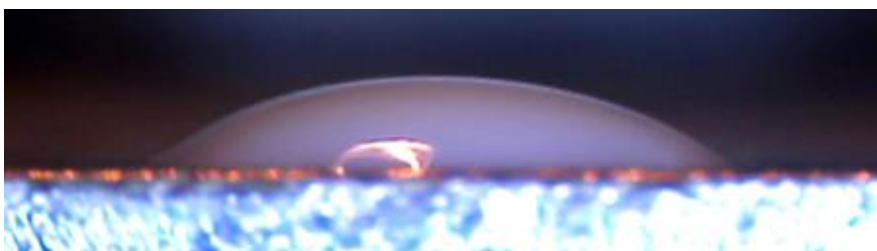


Obr. 73: Smáčecí úhel 23° pro roztok TLC na materiálu FR4

Stejné měření pro roztok s kapalnými krystaly byl proveden i pro skupinu různých materiálů, mezi něž patří polyethylentereftalát, sodnovápenaté sklo, pozinkovaný plech, materiál FR4 a materiál FR4 s vrstvou černého laku s označením 14.10 od firmy Den Braven na bázi methoxypropylacetátu a acetonu (tato úprava byla zvolena především s ohledem na budoucí použití této kombinace v další části této práce, která se zabývá ověřováním tepelného návrhu desky plošného spoje). Výsledky měření jsou vypsány v Tab. 8 a jsou zaznamenané na Obr. 74 až Obr. 77. Obecně se roztok kapalných krystalů pohybuje na hranici mezi dobrou a velmi dobrou smáčivostí, takže je možné jej na tyto povrchy nanášet bez předchozích úprav. Nejvyšší hodnotu smáčecího úhlu měl v tomto případě povrch materiálu FR4 s černým lakem a to konkrétně 38° , což je silně v kontrastu s jinak velmi dobrým smáčecím úhlem 23° , pro samostatný FR4 materiál. Nicméně 38° je stále dobré smáčení, takže pro aplikaci není potřeba využívat povrchových úprav.



Obr. 74: Smáčecí úhel 35° pro roztok TLC na PET folii



Obr. 75: Smáčecí úhel 34° pro roztok TLC na pozinkovaném plechu



Obr. 76: Smáčecí úhel 24° pro roztok TLC na sodnovápenatém skle



Obr. 77: Smáčecí úhel 38° pro roztok TLC na materiálu FR4 s černým lakem

Tab. 8: Velikosti smáčecích úhlů roztoku kapalných krystalů pro různé povrchy

Povrch	Smáčecí úhel [°]	Kategorie smáčení
PET	35	Dobré
Sodnovápenaté sklo	24	Velmi dobré
Pozink. plech	34	Dobré
FR4	23	Velmi dobré
FR4 s černým lakem	38	Dobré

10.2 Aplikace a testování vrstvy TLC na DPS

Jak již bylo zmíněno výše, tak pro aplikaci TLC je nejvhodnější černý povrch zajišťující, že barva podkladu nebude interferovat s barvou odraženou od kapalných krystalů. Z tohoto důvodu byla na všechny zkoumané povrchy aplikována vrstva černého laku s označením 14.10 od firmy Den Braven. Mezi aplikací černého laku a vrstvy kapalných krystalů jsme nechali uběhnout 48 hodin, aby bylo jisté, že všechny rozpouštědla obsažené v laku stihli vytékat.

Samotnou aplikaci TLC roztoku je možné provést různými způsoby, ale jelikož pro naše účely máme k dispozici pouze 100 ml roztoku je potřeba zvolit metodu, jenž povede, co k nejmenším ztrátám. První a nejjednodušší metoda bylo použití jemného štětce ze syntetických vláken. Tato metoda je levná, jednoduchá, ale není možné s ní docílit zcela rovnoměrného nánosu daného roztoku. Druhou možností bylo využití "airbrush" stříkací pistole, viz Obr. 78, jenž nabízela lepší rovnoměrnost vrstvy, vyšší rychlost a komfort nánosu. Nanášení touto stříkací pistolí probíhalo při tlaku 200 kPa (2 bary) s plně otevřenou tryskou. Velice důležité bylo použití bezolejového kompresoru nebo rozvodu stlačeného vzduchu. V opačném případě by hrozila kontaminace nanesené vrstvy a samotné stříkací pistole.



Obr. 78: "Airbrush" stříkací pistole

10.2.1 Testování TLC nanesených štětcem na část základní desky

Pro vyzkoušení metody nanášením štětcem jsme použili základní desku ze starého stolního počítače, viz Obr. 79.

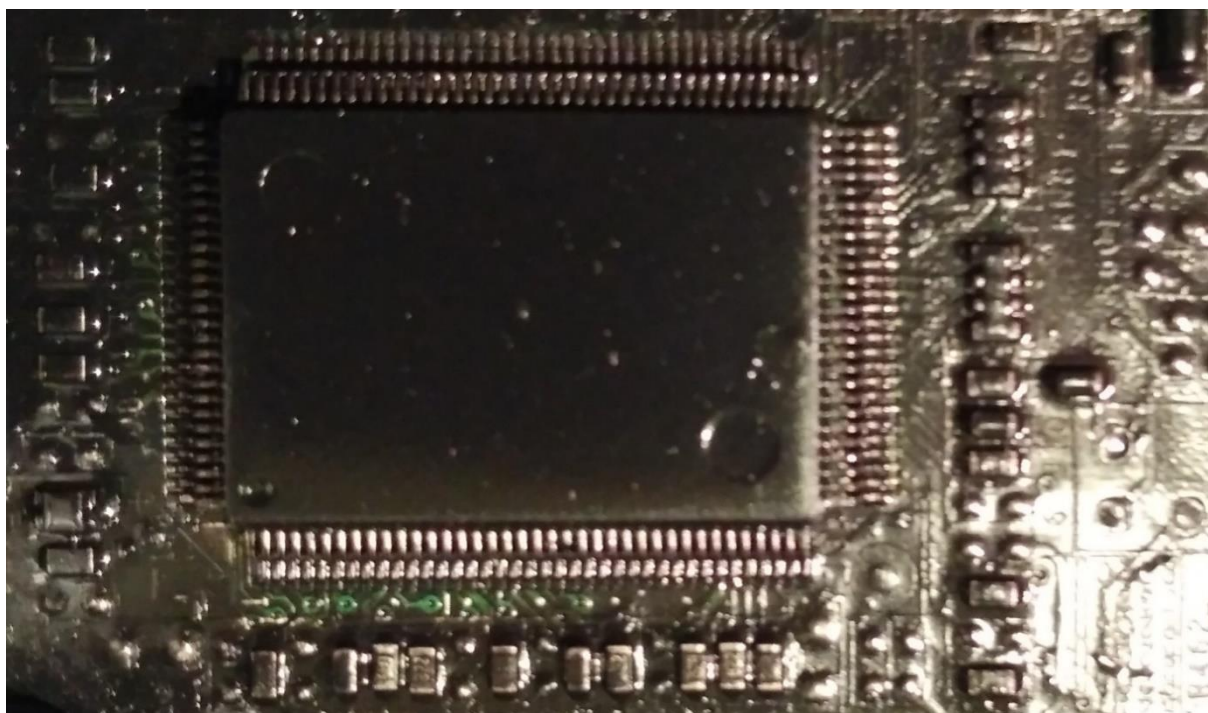


Obr. 79: Základní deska sloužící jako základ pro testování TLC

Konkrétně jsme si vybrali oblast s integrovaným obvodem obsahující BIOS dané základní desky. Integrovaný obvod s označením SMC MK42i Phoenix 1996, který je zobrazen na Obr. 80. Následně jsme nanесли vrstvu výše zmiňovaného černého laku, výsledek je na Obr. 81 a po 48 hodinách byla nanášena vrstva kapalných krystalů SC100. Celkově byly použity dvě vrstvy, kdy mezi aplikací jednotlivých vrstev uplynulo přibližně 15 minut. Na Obr. 82 je vidět, že se nám podařilo docílit dostatečně rovnoměrné vrstvy, nicméně je zřejmé, že roztok s kapalnými krystaly nedokázal dobře smáčet kovové vývody a pájecí plošky. V následujícím kroku byla základní deska propojena se zdrojem a zapnuta. Teplota okolí během testování byla 20 °C.



Obr. 80: Oblast zvolená pro testování TLC (BIOS čip)



Obr. 81: Oblast zvolená pro testování TLC s vrstvou černého laku (BIOS čip)

Vyhodnocení testování oteplení BIOS čipu

Kompletní záznam z testování oteplení BIOS čipu je dostupný na těchto webových adresách:

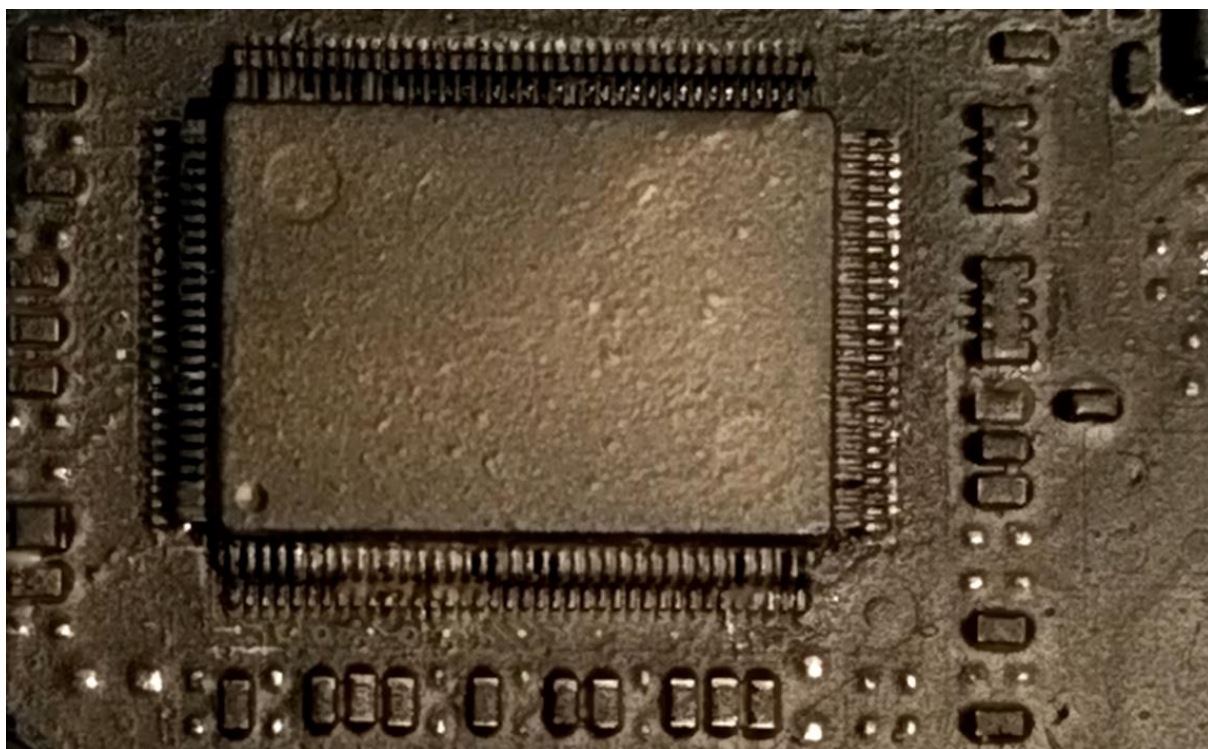
www.youtube.com/watch?v=iBWngczWvMk

www.vimeo.com/205765722

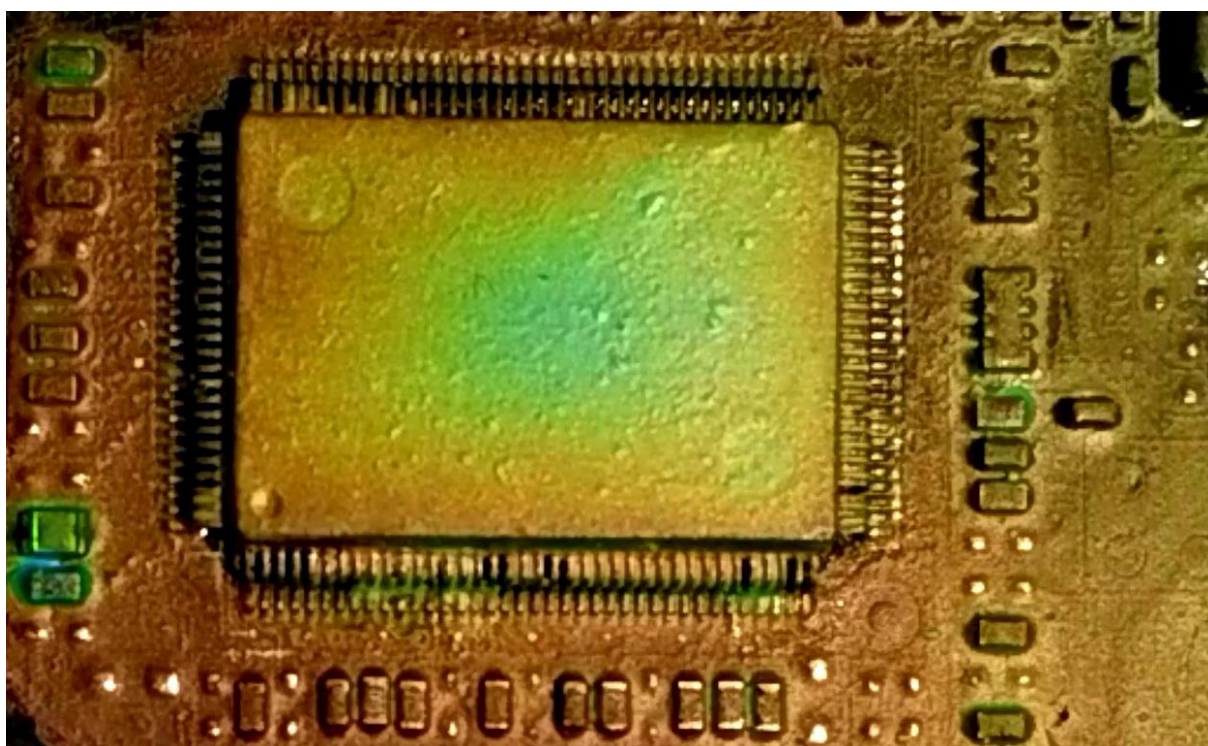
Proces zahřívání součástek je zachycen také na Obr. 82 až Obr. 84 uvedených níže. Kde z těchto obrázků je zřejmé, která část čipu a okolních SMD součástek je nejvíce tepelně namáhána. Pro určení teploty dané součástky je možné použít Tab. 9, která byla experimentálně určena v předchozí části této práce. Nejvyšší teploty zde dosáhla součástka v levém dolním rohu. Součástka je tmavě modrá, což odpovídá teplotnímu intervalu 36 °C až 40 °C.

Tab. 9: Převodní tabulka barev použitých TLC pro jednotlivé teplotní intervaly

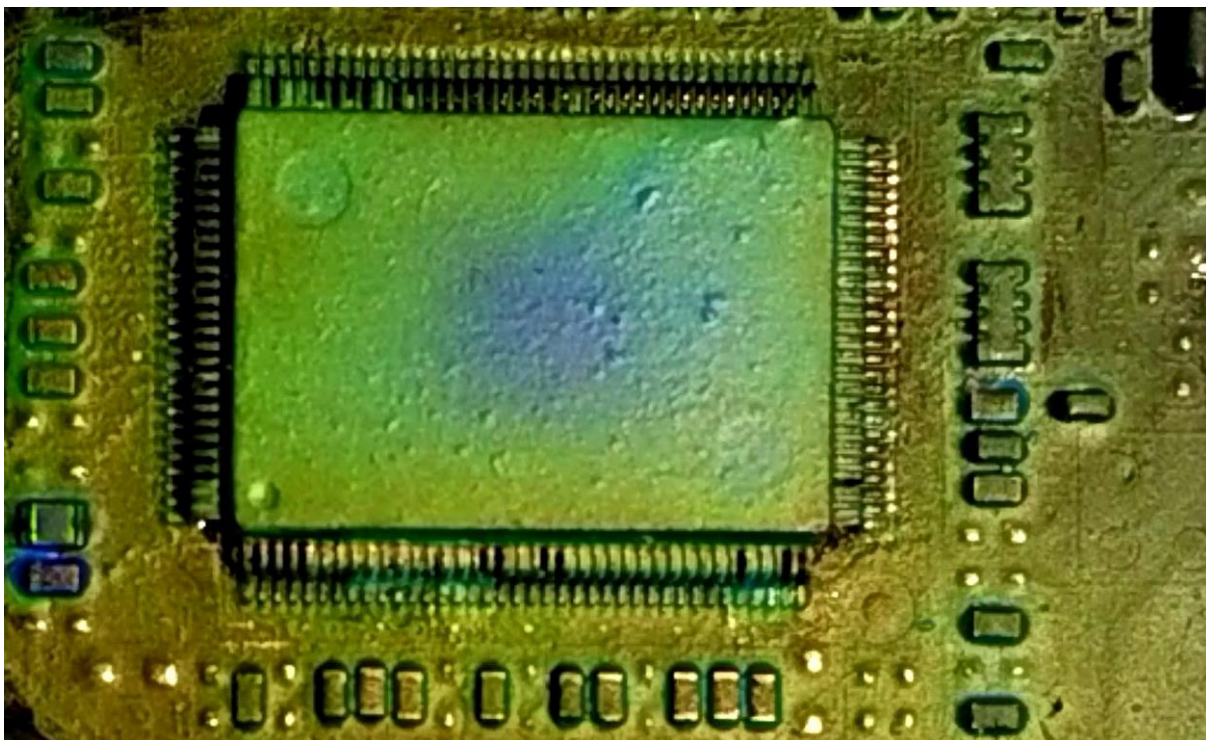
Rozsah teplot [°C]	Barva	Barva (HEX)
40 - více	Šeděmodrá	54566D
36 - 40	Enziánová modrá	39548B
34 - 36	Světle modrá	6676fD
32-34	Tyrkysová modrá	0CCED7
28-32	Zelenožlutá	67CB75
27-28	Béžová	B8C769
26-27	Ohnivě červená	D6653F
Méně - 26	Černá (barva podkladu)	---



Obr. 82: Oblast s vrstvou TLC nanesených pomocí jemného štětce (BIOS čip)



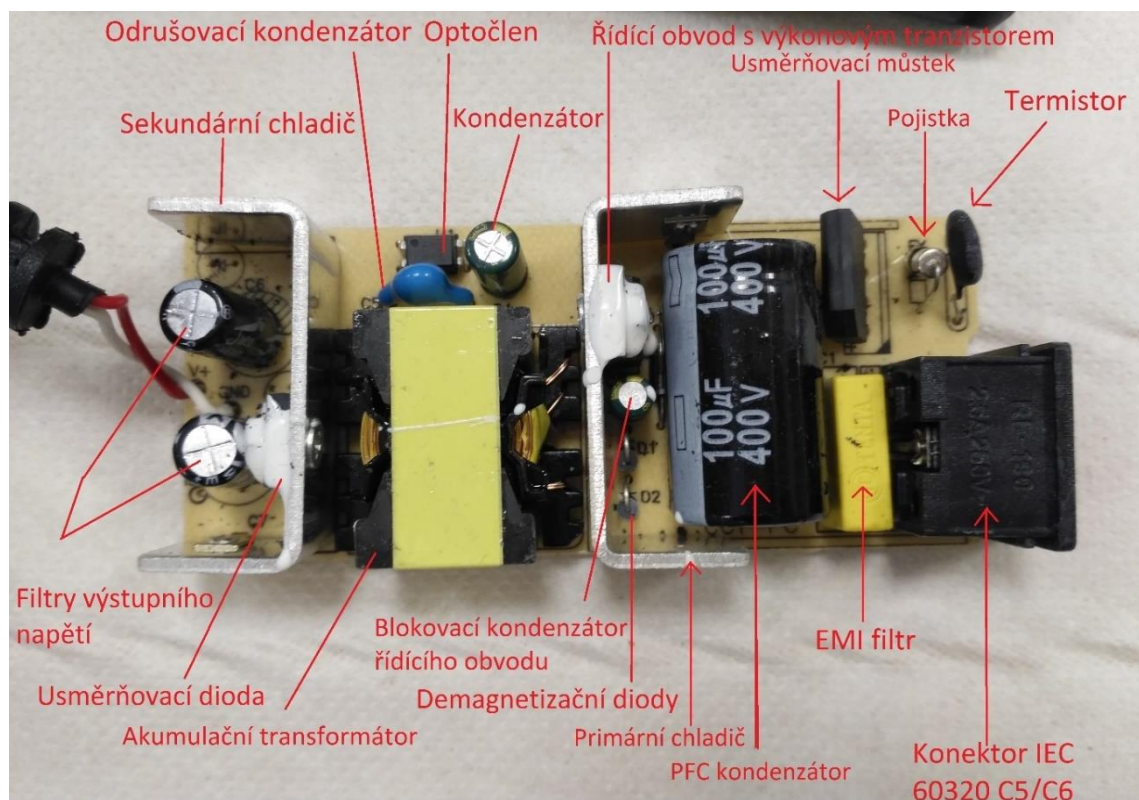
Obr. 83: Zahřátá oblast s vrstvou TLC (BIOS čip)



Obr. 84: Zahřátá oblast s vrstvou TLC (BIOS čip)

10.2.2 Testování TLC nanesených štětcem na spínaný zdroj

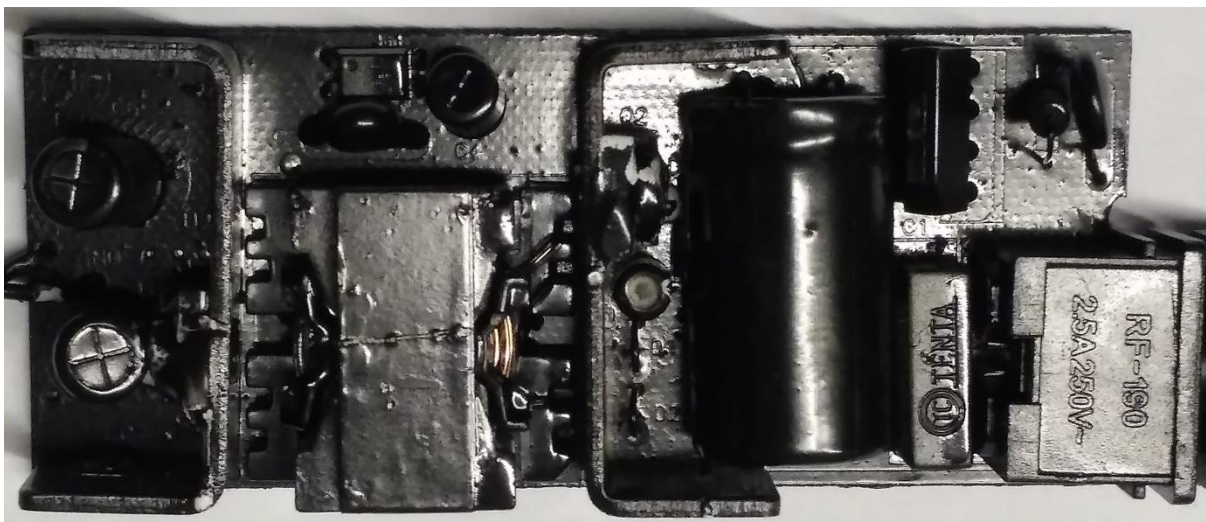
Dalším zkoumaným prvkem byl spínaný zdroj výkonu 65 W s parametry 19 V 3,42 A. Opět jsme jako v předchozím případě nanесли vrstvu černého laku a následně dvě vrstvy TLC. Na Obr. 85 můžeme vidět horní stranu DPS použitého zdroje s popisem jednotlivých komponent, u kterých budeme sledovat jejich postupné zahřívání. Spodní strana vybraného zdroje je vidět na Obr. 86. Na spodní straně bude možné pozorovat, jakým způsobem se ohřev horních součástek promítá na spodní stranu DPS. Test probíhal při pokojové teplotě 20 °C a plném zatížení zdroje.



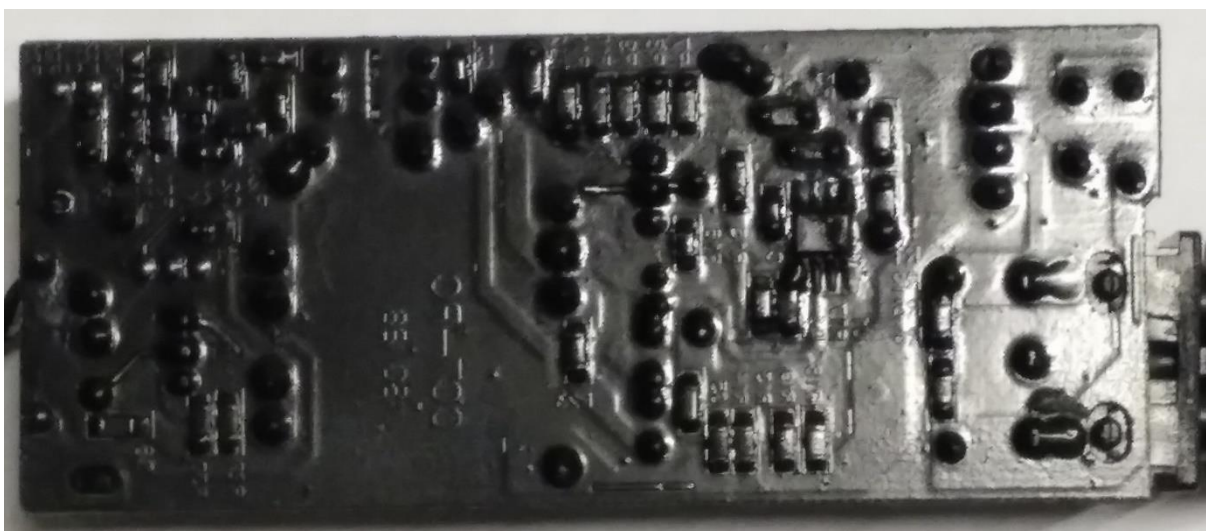
Obr. 85: Horní strana DPS spínaného zdroje s popisky jednotlivých součástek



Obr. 86: Spodní strana DPS spínaného zdroje



Obr. 87: Horní strana DPS spínaného zdroje s nanesenou vrstvou černého laku



Obr. 88: Spodní strana DPS spínaného zdroje s nanesenou vrstvou černého laku

Vyhodnocení testování oteplení spínaného zdroje

Kompletní záznam z testování spínaného zdroje je dostupný na těchto webových adresách:

www.youtube.com/watch?v=mhrlSLB6uIo

www.vimeo.com/206253275

Pro určení teploty, jenž odpovídá konkrétní barvě v uvedeném záznamu je možné použít převodní Tab. 3 a Tab. 9.



Obr. 89: Horní strana DPS spínaného zdroje se štětcem nanesenou vrstvou TLC

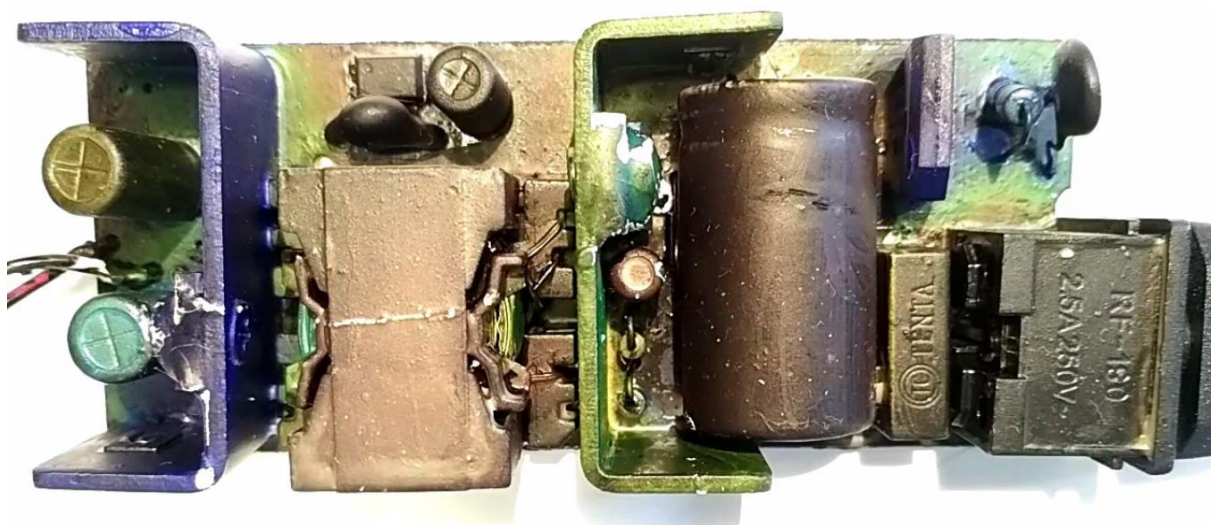


Obr. 90: Spodní strana DPS spínaného zdroje se štětcem nanesenou vrstvou TLC

Doba od zapnutí: 2 minuty 20 sekund

Součástka s nejrychlejším nástupem teploty je NTC termistor (negastor), což je poměrně logické, jelikož jeho funkce je důležitá pouze v prvních sekundách po zapojení zdroje do sítě, kdy má omezovat nabíjecí proud kondenzátoru. Na tomto příkladu s termistorem se ukazuje nevýhoda kapalných krystalů spočívající v omezení horní měřitelné teploty nad tzv. “clearing point“. Nad touto teplotou jsou kapalně krystaly transparentní a není tedy možné dále určit teplotu daného povrchu. Druhé nejrychleji oteplené součástky byly usměrňovací můstek a usměrňovací dioda, což se zároveň projevilo na sekundárním chladiči.

Zvláštností bylo, že řídicí obvod s primárním chladičem dosáhl nižšího oteplení oproti usměrňovací diodě a sekundárnímu chladiči. Těmito součástkami dochází k průchodu stejného výkonu a dá se tedy předpokládat, že polovodičový prvek na primárním chladiči má nižší ztrátový výkon. V souvislosti s usměrňovací diodou můžeme pozorovat, jak tato součástka svým výkonem výrazně ovlivňuje jeden z kondenzátorů sloužící jako filtr výstupního napětí. Mezi součástky, které nepřekročili teplotu 26 °C, a tudíž se jeví, jako černé patří optočlen, konektor C5/C6, EMI filtr, kondenzátor a odrušovací kondenzátor.



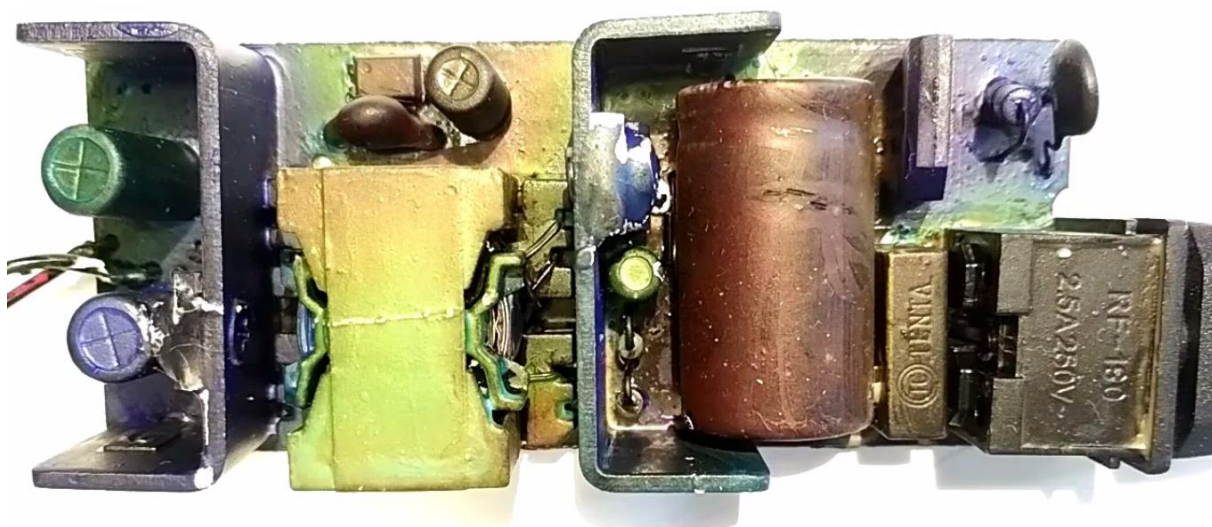
Obr. 91: Horní strana DPS zdroje s vrstvou TLC v čase 2:20 od zatížení zdroje



Obr. 92: Spodní strana DPS zdroje s vrstvou TLC v čase 2:20 od zatížení zdroje

Doba od zapnutí: 3 minuty 20 sekund

Na níže přiložených obrázcích je vidět, že usměrňovací dioda již překročila teplotu “clearing point“ a přešla opět do černé podkladové barvy. To samé se částečně stalo i s usměrňovacím můstkem a sekundárním chladičem. U ostatních součástek došlo převážně k posunu na další barevné fáze. Nechladnější součástkou je stále IEC konektor. Zároveň můžeme pozorovat, jak pomalu nastupuje oteplení u PFC kondenzátoru, což bude také pravděpodobně důsledek jeho vysoké tepelné kapacity. Při pohledu na spodní stranu DPS je možné vidět, že teplota na spodní straně prakticky kopíruje vzor z horní části desky a nejvíce zatížené části jsou pod usměrňovací diodou, termistorem a usměrňovacím můstkem. Spodní část desky, která je pod IEC konektorem má stále teplotu pod 26 °C.



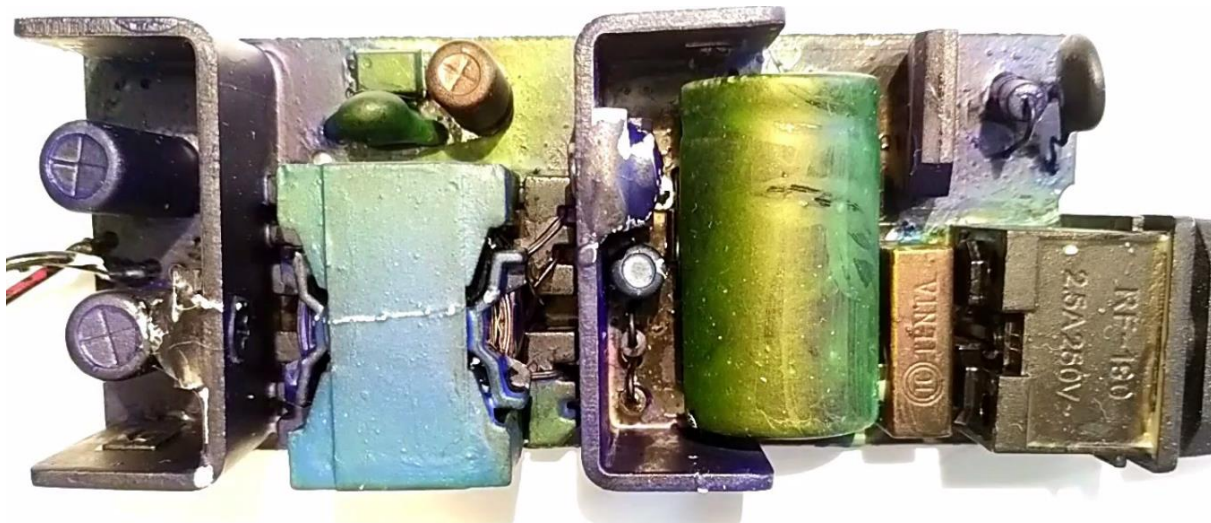
Obr. 93: Horní strana DPS zdroje s vrstvou TLC v čase 3:20 od zatížení zdroje



Obr. 94: Spodní strana DPS zdroje s vrstvou TLC v čase 3:20 od zatížení zdroje

Doba od zapnutí: 4 minuty 50 sekund

Na tomto snímku můžeme pozorovat, jak rozdílné je ohřátí levé a pravé části PFC kondenzátoru, což je pravděpodobně způsobené působením řídicího výkonového obvodu a jemu přilehlého chladiče. Spodní strana desky je již silně prohřátá na rozmezí 40 a více °C (tmavě modrá barva a následný přechod do černé), až na oblast pod IEC konektorem, optočlenem a kondenzátory.



Obr. 95: Horní strana DPS s vrstvou TLC v čase 4:50 od zatížení zdroje



Obr. 96: Spodní strana DPS zdroje s vrstvou TLC v čase 4:50 od zatížení zdroje

Doba od zapnutí: 12 minut 50 sekund

Po necelých třinácti minutách po uvedení zdroje do provozu jsme dosáhli plného oteplení a dále již nedocházelo ke změnám barvy povrchu jednotlivých součástek ani desky. Jak je možné vidět na obrázcích níže, tak chladiče, usměrňovací můstek a diody, optočlen a termistor již přesáhli teplotu 40 °C a jsou tedy černé. Modré součástky se ustálily v teplotním intervalu 36 °C až 40 °C. Dvojicí nejchladnějších součástek se stal EMI filtr a IEC konektor, u kterého se teprve začalo projevovat nějaké zbarvení, takže teplota se pohybuje někde těsně pod hranicí 26 °C. Spodní strana desky je až na část pod IEC konektorem zcela rozehřáta nad 40 °C.



Obr. 97: Horní strana DPS zdroje s vrstvou TLC v čase 12:50 od zatížení zdroje



Obr. 98: Spodní strana DPS zdroje s vrstvou TLC v čase 12:50 od zatížení zdroje

10.2.3 Testování TLC nanesených stříkací pistolí na základní desku

Pro vyzkoušení nanášení vrstvy kapalných krystalů pomocí stříkací pistole jsme opět zvolili základní desku ze starého PC, která byla stejně jako v předchozím případě nanесena vrstvou základního černého laku. Nanášení stříkací pistolí bylo výrazně rychlejší než při použití štětce. Z tohoto důvodu byla vrstva TLC nanесena na celý povrch základní desky, viz Obr. 99.



Obr. 99: Základní deska s vrstvou s vrstvou TLC nanesených stříkací pistolí

Vyhodnocení testování oteplení celé základní desky

Kompletní záznamy z testování základní desky jsou dostupné na těchto webových adresách:

Pohled na celou základní desku:

www.youtube.com/watch?v=bYbTrK6x-60

www.vimeo.com/206399197

Pravý dolní roh základní desky:

www.youtube.com/watch?v=NESRUnEOccY

www.vimeo.com/206399125

Levý dolní roh základní desky:

www.youtube.com/watch?v=6Zef-uJOZoU

www.vimeo.com/206399044

Levý horní roh základní desky:

www.youtube.com/watch?v=4hec7FdRXi4

www.vimeo.com/206399175

Boční záběr na chladič:

www.youtube.com/watch?v=2nNI4ggxu8A

www.vimeo.com/206398988

Pod hlavním záběrem na základní desku jsou přidány detailní záběry na jednotlivé části desky. Je možné si všimnout, že se snímky v nepatrných detailech liší, což je způsobeno tím, že detailní záběry jednotlivých částí bylo nutné udělat zvlášť, jelikož by kamery při snímání detailních záběrů zablouklou desku jako celek. Z toho důvodu je nutné brát detailní záběry pouze jako doplněk, demonstrující možnost pozorování i těch nejmenších SMD součástek. Fakt, že v záběrech jsou malé rozdíly, vypovídá o tom, že oteplení součástek závisí i na dalších parametrech, jako je například okolní proudění vzduchu. To může být ovlivněno samotnou přítomností kamery. Detailní záběry byly k celkovému záběru spárovány pomocí časové stopy plynoucí od zapnutí základní desky. Pro určení teploty, jenž odpovídá konkrétní barvě v uvedeném záznamu je možné použít převodní Tab. 3 a Tab. 9.

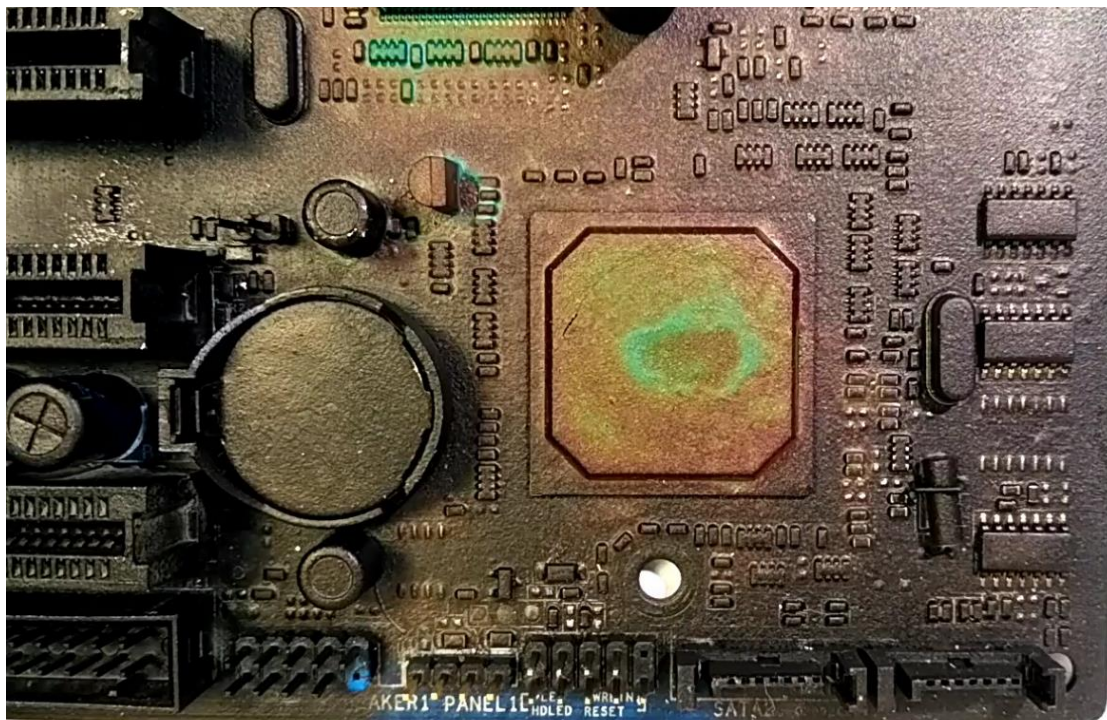
Doba od zapnutí: 1 minuta 10 sekund

Jak můžeme vidět v levém horním rohu Obr. 100, tak mezi nejrychleji prohřáté součástky patří cívky a některé integrované obvody napříč celou deskou. Zcela beze změny zůstaly všechny elektrolytické kondenzátory, plastové konektory a RAM moduly.

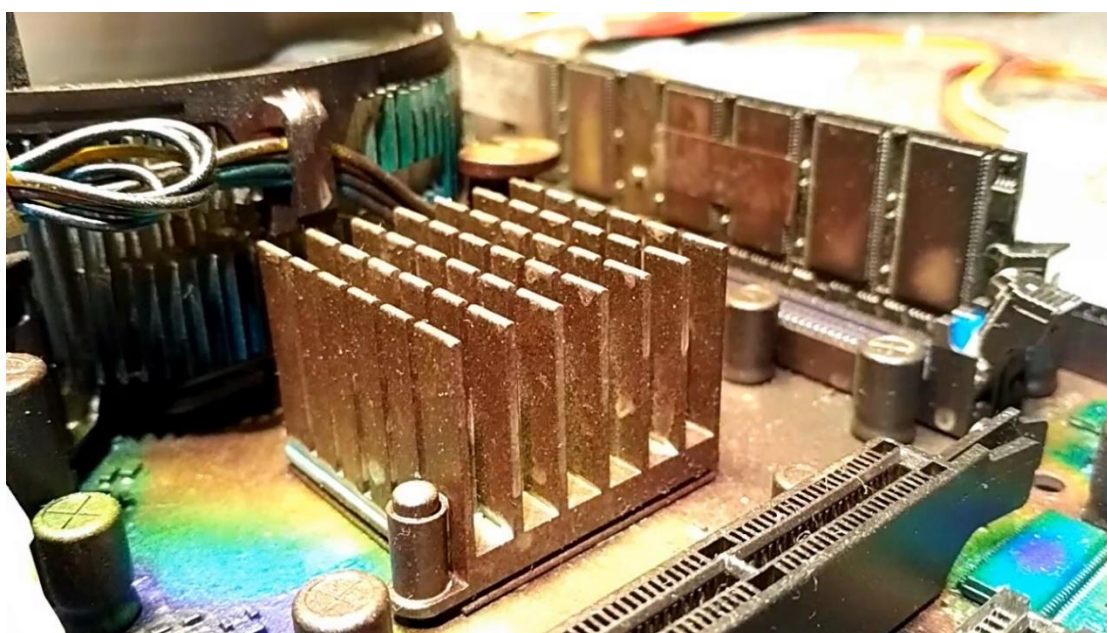


Obr. 100: Základní deska s vrstvou s vrstvou TLC, 1 minutu 10 sekund od zapnutí

Na Obr. 101 je možné si všimnout, že i pomocí stříkací pistole se nepodařilo docílit zcela rovnoměrné vrstvy a na velké ploše integrovaného obvodu došlo ke shluku částic kapalných krystalů a vytvoření vrstvy s větší tloušťkou. Tato vrstva se vyznačuje barvou s vyšší teplotou, což je pravděpodobně způsobeno tím, že tloušťka dané vrstvy je natolik silná, aby dané místo intenzivněji odizolovala. Na Obr. 102 je z bočního pohledu možné pozorovat, jak se prohřívá žebrování na chladiči procesoru.



Obr. 101: Dolní pravý roh s vrstvou TLC, cca 1 minutu od zapnutí



Obr. 102: Chladič na základní desce s vrstvou TLC, přibližně 1 minutu od zapnutí

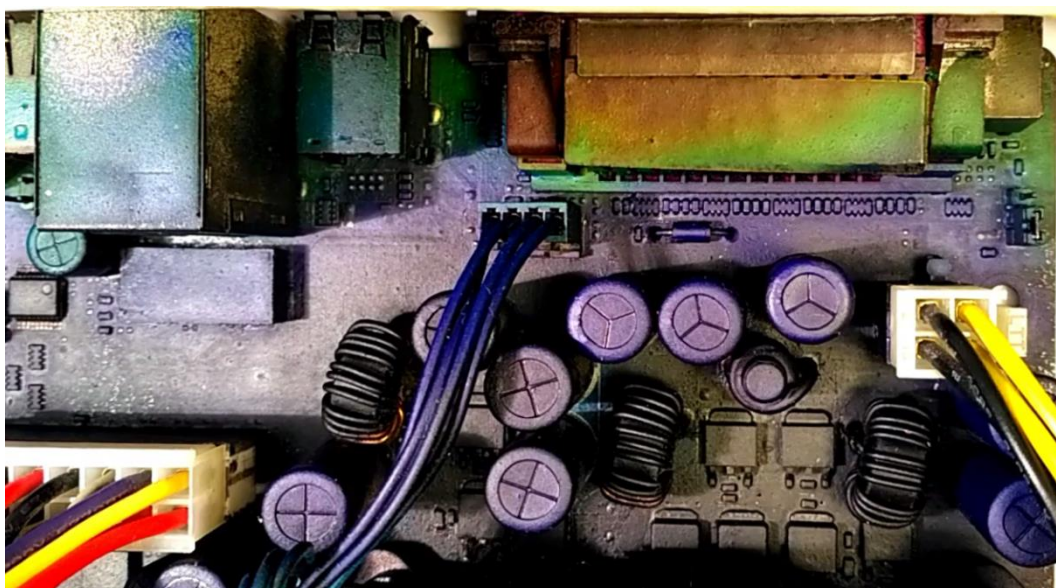
Doba od zapnutí: 4 minuty

Čtyři minuty od zapnutí je téměř celý povrch základní desky rozežřátý nad teplotu 26 °C (pouze IDE konektor na pravém okraji je pod touto teplotou). Obecně nejchladnější je oblast s PCI konektory ve spodní části desky.

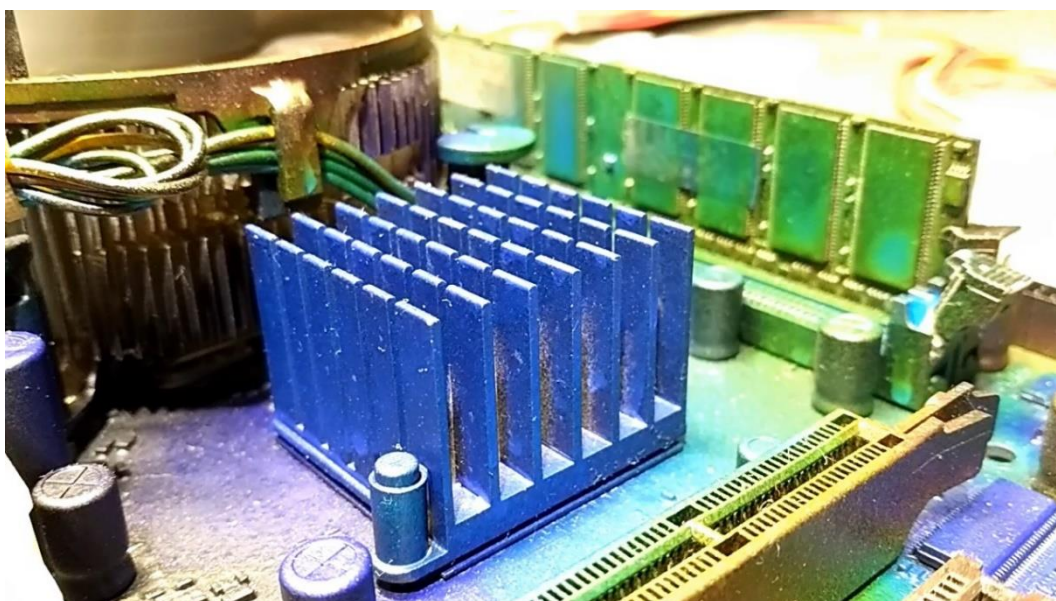


Obr. 103: Základní deska s vrstvou TLC, 4 minuty od zapnutí

Na Obr. 104 je detailní záběr na oblast, která nejvíce prohřívána cívkami a výkonovými transistory. Ztrátový výkon z těchto součástek dokázal již během 4 minut ohřát elektrolytické kondenzátory na teplotu přibližně 40°C. Na Obr. 105 je možné pozorovat detail žebrování chladiče. Je vidět, že chladič vykazuje stejnou barvu po celé své ploše, což nám dává informaci o kvalitním návrhu daného chladiče. Ten je tak schopný skrze průřezy jednotlivých žebér předávat tepelnou energii i do nejvyšších částí chladiče a tím optimálně využívá celou svoji plochu. Pokud by byl měl chladič špatný návrh, projevilo by se to viditelným teplotním gradientem mezi horní a spodní částí žebrování.

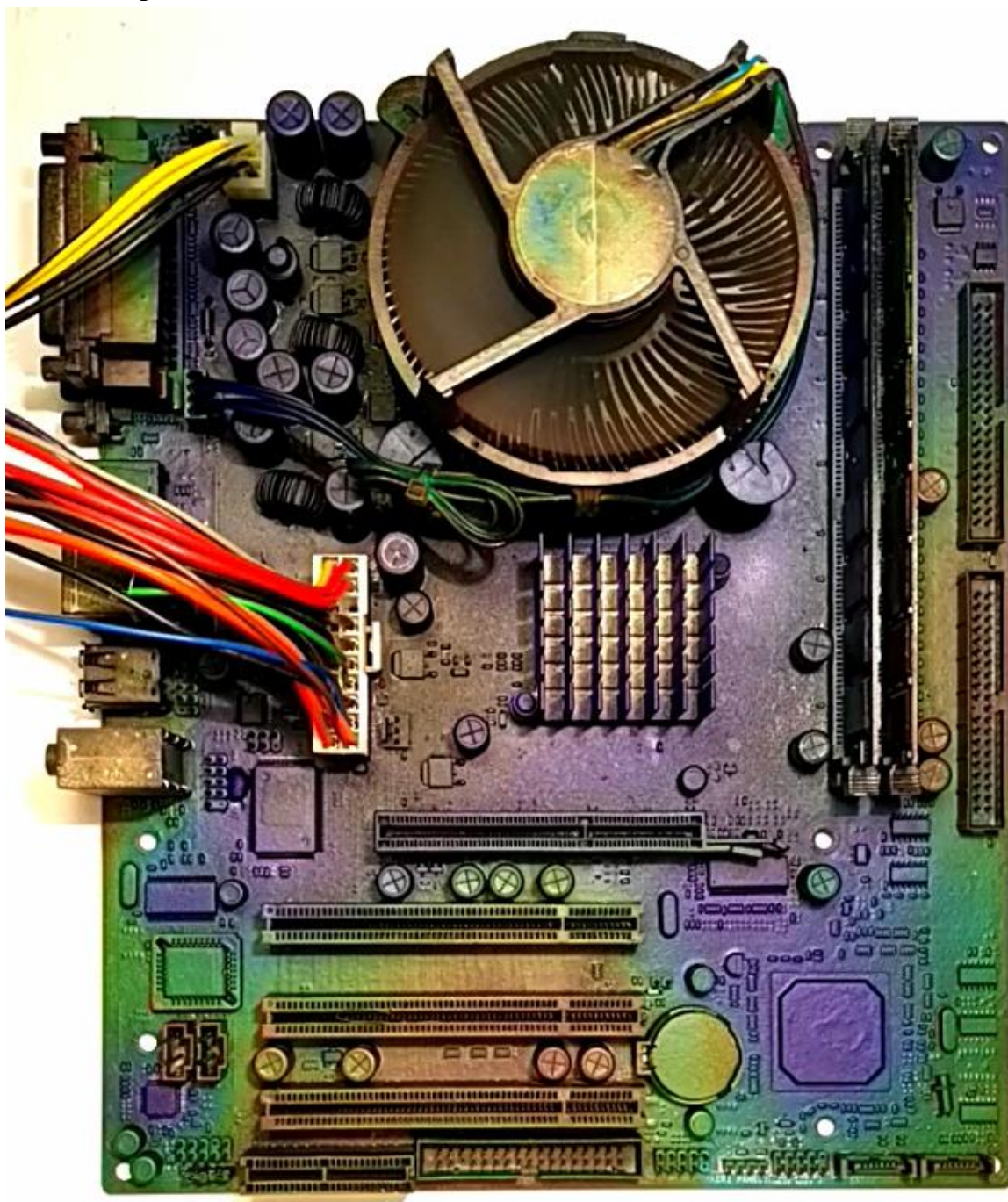


Obr. 104: Levý horní roh základní desky s vrstvou TLC, cca 4 minuty od zapnutí



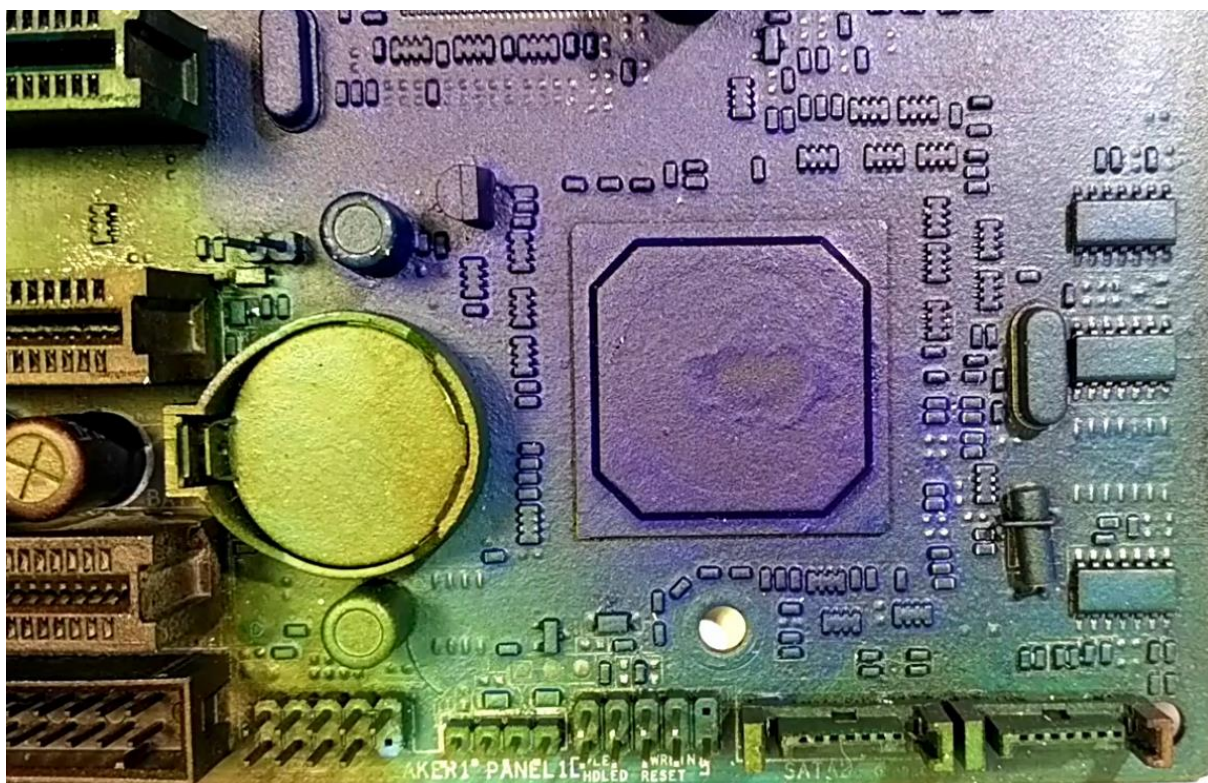
Obr. 105: Chladič na základní desce s vrstvou TLC, cca 4 minuty od zapnutí

Doba od zapnutí: 6 minut



Obr. 106: Základní deska s vrstvou TLC, 6 minut od zapnutí

Na Obr. 107 můžeme vidět, že shluk kapalných krystalů, který se vytvořil na pouzdru integrovaného obvodu, a který způsobil lokálně větší oteplení, viz Obr. 101, již při vyšší teplotách nepředstavuje větší význam a čip má relativně rovnoměrné zabarvení, i když hranice shluku kapalných krystalů jsou stále rozpoznatelné.



Obr. 107: Dolní pravý roh základní desky s vrstvou TLC, cca 6 minut od zapnutí

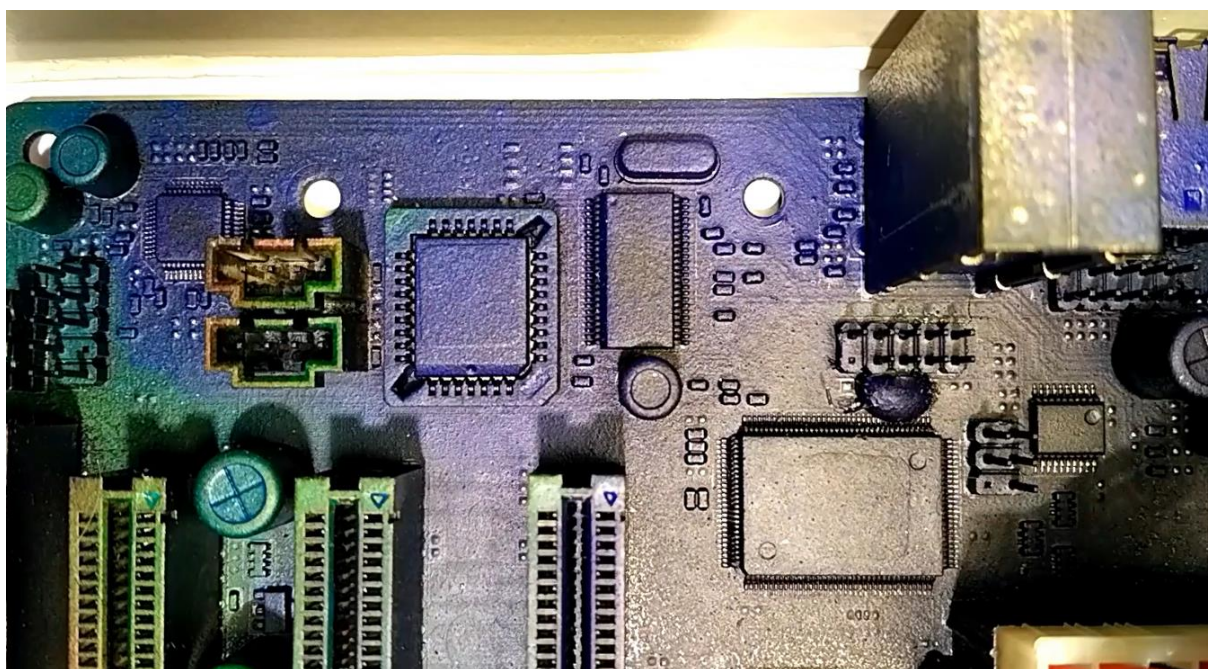
Doba od zapnutí: 9 minut

Po devíti minutách testování jsme dosáhli téměř kompletního oteplení desky a v následujících minutách jsme zaznamenali pouze minimální změny.



Obr. 108: Základní deska s vrstvou TLC, 9 minut od zapnutí

Na níže přiloženém Obr. 109 je možné si všimnout, že i plastové PCI sloty, které sami o sobě neemitují žádnou tepelnou energii, se už po devíti minutách sami dostali na teplotu okolo 40°C. S tímto je důležité počítat při výběru polymeru pro výrobu těchto konektorů, aby nedocházelo k jejich degradaci ve formě křehnutí či ztráty pevnosti, a to v důsledku právě tepelného namáhání od okolních součástek.



Obr. 109: Dolní levý roh základní desky s vrstvou TLC, přibližně 9 minut od zapnutí

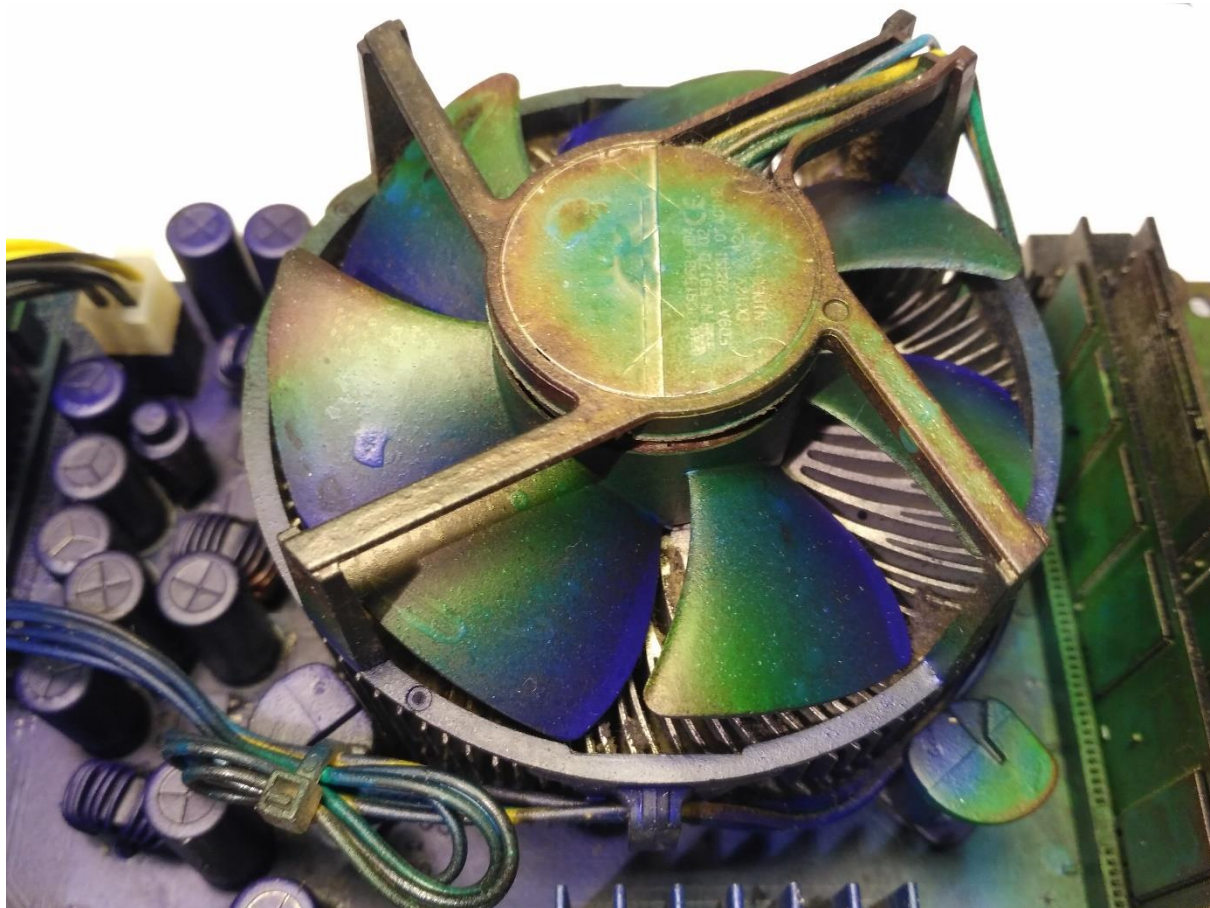
Doba od zapnutí: 18 minut

Testování oteplení skončilo po 18 minutách, kdy již nedocházelo k žádnému posunu v barevném spektru jednotlivých povrchů a došlo i ke kompletnímu prohřátí spodní části s PCI konektory, která byla vždy nechlazenější.



Obr. 110: Základní deska s vrstvou TLC, 18 minut od zapnutí

Po vypnutí základní desky byl ještě pořízen záznam chladnutí zpět na pokojovou teplotu. Zajímavé bylo pozorovat jakým způsobem je rozděleno teplo na lopatkách ventilátoru u chladiče procesoru, viz Obr. 111. Z obrázku je zřejmé, že spodní části lopatek mají teplotu přibližně 36 °C a naopak horní část lopatek se pohybují v teplotách okolo 26 °C.



Obr. 111: CPU chladič s vrstvou TLC, cca 1 minutu po vypnutí desky

11 Porovnání TLC a termokamer

Důležitou otázkou při použití kapalných krystalů v oblasti mapování tepla je, jaké výhody a nevýhody tato technologie má oproti mnohem rozšířenější technologii termokamer pracujících s infračerveným zářením. Za tímto účelem bylo vybráno pět základních kritérií, dle kterých budou tyto technologie porovnány. Konkrétně se jedná o teplotní rozsah, rozlišení a ostrost obrazu, přesnost, uživatelský komfort a cenu.

11.1 Teplotní rozsah

Teplotní rozsah je velice důležitý parametr z hlediska mapování tepla. Jak již bylo zmíněno výše, tak termochromní kapalně krystaly jsou komerčně dostupné s rozsahem teplot od 20 °C do 120 °C. [17] Případně je možné připravit krystaly v požadovaném rozsahu podle **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Námi užívané krystaly měly teplotní rozsah od 26 °C do 40 °C. Jak jsme se mohli přesvědčit, tak na provedení testování oteplení DPS, byl tento rozsah dostačující. Nicméně se našli i takové oblasti (oblasti s výkonovými prvky), jenž velice brzy přešli do transparentního stavu v důsledku překročení teploty „clearing point“ a vyšší teploty již nebyly schopné zobrazit. Z pohledu termokamer je dostupnost různých teplotních rozsahů mnohem příznivější. Komerčně dostupné jsou například kamery pro energetické aplikace, jako například kamera GF309 od firmy Flir, jejíž teplotní rozsah je od -40 °C do 1500 °C. [24] Takovýto rozsah je samozřejmě pro aplikace v elektrotechnice zbytečný. Kamery, jenž jsou určeny pro aplikaci v elektrotechnickém průmyslu mají převážně rozsahy od -20 °C do 350 °C. [25] Z hlediska tepelného rozsahu nabízí termokamery větší komfort, nicméně neplatí to obecně pro všechny druhy a modely termokamer a je potřeba vybírat takovou, která bude odpovídat požadované aplikaci.

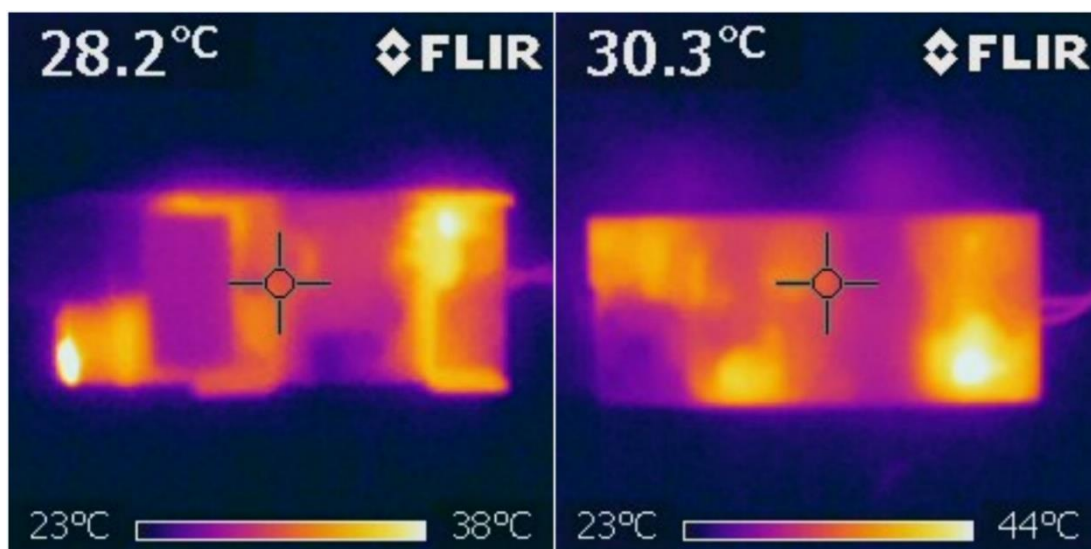
11.2 Rozlišení a ostrost obrazu

Dalším podstatným parametrem pro tepelnou diagnostiku DPS je rozlišení (počet obrazových bodů) dané technologie a ostrost obrazu. Při použití kapalných krystalů jsme teoreticky omezení pouze velikostí jednotlivých mikrokapslí, jenž se pohybuje v jednotkách až desítkách mikronů a také samozřejmě rozlišovací schopností lidského oka. [16] V případě záznamu jsme přirozeně limitováni rozlišení záznamového zařízení. To samozřejmě platí i z hlediska ostrosti obrazu. Rozlišení komerčních termokamer se pohybuje v širokém rozmezí.

U základních modelů je možné často narazit na rozlišení 240x240, což není mnoho a u kamer sloužící ve výzkumu a vývoji v oblasti elektrotechnického průmyslu se můžeme potkat i s rozlišením 640x480. [25] Z hlediska ostrosti obrazu se termokamery dodávají ve třech provedeních, a to bez ostření, s manuálním ostření a s automatickým ostření. Základní modely termokamer jsou často vybaveny technologií bez ostření obrazu, která je nejlevnější, ale není vhodná na makrosnímky. Pro použití snímání HDI struktur na DPS je samozřejmě lepší mít kameru, jenž ostření obrazu ať už automatické či manuální umožňuje.

V rámci této práce byly porovnány snímky získané námi dostupnou termokamerou FLIR i7 a snímky s termochromními kapalnými krystaly nasnímanými běžnou kamerou dostupnou v mobilních telefonech s rozlišením 1280x720. Z pořízených snímků, které jsou na Obr. 112 až Obr. 116 je vidět že jak z hlediska rozlišení, tak z hlediska ostrosti obrazu vychází kombinace kapalných krystalů s kamerou mobilního telefonu podstatně lépe. Na snímcích z termokamery je možné vidět pouze nejvýznamnější zdroje tepla, ale není již možné pozorovat jaký vliv to má na okolní součástky a prvky DPS. Tyto součástky není možné spatřit ať už kvůli jejich malé velikosti nebo kvůli “koroně” jenž obkresluje silné zdroje tepla.

Termokamery, jenž jsou primárně určené právě pro výzkum a vývoj v oblasti elektrotechniky mají samozřejmě parametry rozlišení a ostrosti obrazu přizpůsobené tomuto účelu a kvalita jejich snímků tomu odpovídá. Viz Obr. 117 jenž byl pořízen kamerou FLIR E60 s rozlišením 320x240 a manuálním zaostřováním. [26]



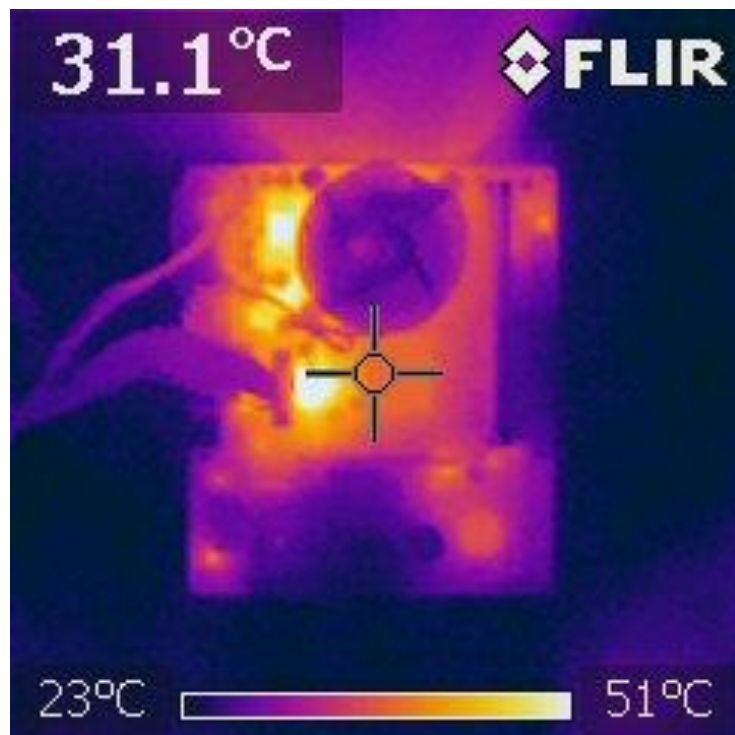
Obr. 112: Horní a spodní strana spínaného zdroje nasnímaná termokamerou FLIR i7



Obr. 113: Horní strana DPS spínaného zdroje



Obr. 114: Spodní strana DPS spínaného zdroje



Obr. 115: Základní deska nasnímaná termokamerou FLIR i7



Obr. 116: Základní deska s vrstvou TLC



Obr. 117: Snímek DPS pořízený kamerou FLIR E60 [26]

11.3 Přesnost

U termochromních kapalných krystalů je citlivost na změny teploty závislá na konkrétní složení použité směsi. Námi použité kapalné krystaly vykazují přesnost od 1 °C až po 4 °C, přičemž vyšší přesnosti krystaly dosahují ve spodní části teplotního rozsahu, viz Tab. 3. Z principu fungování kapalných krystalů je změna barvy spojitého charakteru a je tedy možné pozorovat i velice jemné změny odstínů barev. To je však omezeno schopnostmi konkrétního pozorovatele a jeho citlivostí na jednotlivé barevné odstíny. V případě videozáznamu je možné zvýšit kontrast a sytost barevného podání v daném záznamu a tím zjednodušit a zpřesnit případnou analýzu.

U termokamer vycházíme ze dvou možných určení přesnosti. První je absolutní vyjádření, které se většinou pohybuje v jednotkách stupňů celsia. Druhé možné vyjádření přesnosti je relativní a jedná se o procenta z odečtené hodnoty. Tato hodnota se běžně pohybuje v jednotkách procent. Termokamera FLIR i7, kterou jsme použili při srovnání rozlišení a ostroty obrazu má hodnoty 2 °C pro absolutní přesnost a 2 % pro přesnost čtení z naměřené hodnoty. Stejně hodnoty nabízí i profesionální kamera FLIR A6700sc, která je určená pro vývoj a výzkum v oblasti elektrotechniky. Z těchto informací je jasné, že porovnání přesností jednotlivých technologií není zcela jednoznačné, a to díky velice individuální schopnosti lidského zraku rozlišovat barvy u termochromních kapalných krystalů. [26],[27]

11.4 Uživatelský komfort

Z hlediska komfortu užívání není zcela jednoznačné, která z těchto metod převyšuje. Technologie termokamer nabízí příznivější řešení v oblastech rychlosti a univerzálnosti použití v kombinaci s jednoduchým ovládáním. Absence povrchových úprav, jako je nanášení černého laku a samotné aplikace roztoku s kapalnými krystaly představuje jednoznačnou výhodu oproti TLC. Z pohledu uživatelského komfortu, je ale třeba poznamenat, že samotné pozorování rozložení tepla je pomocí TLC přirozenější a intuitivnější, než skrz obrazovku termokamery.

11.5 Cena

Cena může často představovat nejzásadnější parametr převyšující výhody a nevýhody jednotlivých technologií. Cena za 100 ml roztoku s kapalnými krystaly SC100, jenž byly použity v této práci, byla přibližně 1500 Kč vč. DPH + doprava 250 Kč vč. DPH. Ze zkušenosti během zpracování této práce vyšlo, že na aplikaci jedné vrstvy kapalných krystalů na ATX základní desku se standardizovanými rozměry 305x244 mm bylo zapotřebí přibližně 4 ml roztoku. Při přepočtu na metr čtvereční nám vychází spotřeba 54 ml/m² neboli 810 Kč/m². Roztok s krystaly je možné aplikovat buďto obyčejným štětcem v hodnotě pár desítek korun nebo pomocí stříkací pistole s kompresorem, jejíž cena se pohybuje ve stovkách či maximálně v jednotkách tisíců korun. Tato cena může být velice lákavá v kontrastu s cenami komerčních termokamer, které se u nejlevnějších modelů pohybují v řádu desítek tisíc korun.

Kameru FLIR i7, jenž byla použita při vypracování této práce, jsme v době vypracování byly schopni nalézt za cenu 63 tisíc korun vč. DPH. Každopádně jsme se mohli přesvědčit, že tato kamera na není vhodná na snímání jemných struktur osazené DPS. Kamera FLIR E60, jejíž snímek můžeme vidět na Obr. 117, a která je již svými parametry dostačující pro výzkum a vývoj DPS se na českém trhu prodává za nejnižší cenu 288 tisíc korun vč. DPH. Z uvedených cen je jasné, že pořízení termokamery je značně nákladné a vyplatí se především při častém využití, kde vyšší cenu vykompenzuje univerzálnost a rychlost. Naopak pro jednorázové nebo nepříliš časté operace představují kapalně krystaly ekonomicky schůdnější variantu.

11.6 Shrnutí porovnání

V níže uvedené Tab. 10 je vytvořen stručný souhrn porovnání technologie termochromních kapalných krystalů a termokamer.

Tab. 10: Shrnutí srovnání termochromních kapalných krystalů a termokamer

Parametr	Technologie	
	Termochromní kapalné krystaly	Termokamera
Teplotní rozsah	20 °C až 120 °C	-40 °C až 1500 °C
Rozlišení a ostrost obrazu	Výborné	Obecně nižší, 240x240 až 640x480
Přesnost	1 °C až 4 °C	2 °C nebo 2 % z hodnoty
Uživatelský komfort	Střední	Vysoký
Cena	Přibližně 1000 Kč/m ²	Desítky až stovky tisíc Kč

12 Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků

Tato kapitola je věnována stručnému shrnutí a zhodnocení výsledků dosažených v praktické části této práce. Zjištěné výsledky a parametry byly testovány na termochromních kapalných krystalech založených na cholesterické bázi s označením SC100.

12.1 Základní vlastnosti a parametry

První experimentálně ověřeným parametrem byla maximální přípustná teplota, jenž nezpůsobí změny v termochromních vlastnostech dané látky. V rámci tohoto experimentu jsme došli k závěru, že maximální přípustná teplota je 70 °C. Další zvyšování teploty na 75 °C až 90 °C již vedlo k poškození ve formě ztráty sytosti barev. Teplota 95 °C způsobila výrazné omezení zobrazovaných barev, a to prakticky pouze na modrou a červenou. Celková ztráta termochromních vlastností se dostavila při teplotě 100 °C.

Druhou ověřovanou vlastností se stala hystereze, tedy posunutí odezvy termochromního materiálu na určitou úroveň teploty. Po dvouměsíčním experimentu jsme došli k závěru, že dané kapalně krystalové nevykazovali hysterezní charakter svých termochromních vlastností.

Třetím ověřovaným parametrem byl teplotní rozsah a rozlišovací schopnost, respektive schopnost rozlišit mezi jednotlivými teplotami změnou odrážené vlnové délky světla. Tato informace byla zcela zásadní, a to z toho důvodu, že v dalších krocích mělo dojít i k praktickému nasazení kapalných krystalů na zmapování tepelného namáhání vybraných desek plošného spoje. Výsledkem tohoto měření bylo zjištění, že *event temperature*, tedy teplota, kdy látka začíná vykazovat termochromní vlastnosti, je u námi zvolených krystalů 26 °C a *clearing point*, tedy přechod do transparentní formy leží mírně nad teplotou 40 °C. Tudíž celkový rozsah využitelný pro měření teploty je 26 °C až 40 °C. Výsledky závislosti barvy na teplotě jsou kompletně shrnuty v Tab. 3.

12.2 Degradací mechanismy

Testovány byly degradační vlastnosti a charakteristiky, vyvolané různými činiteli jako zvýšená vlhkost vzduchu na úroveň 93 %, ponoření ve vodní lázni, cyklické změny teploty a expozice intenzivnímu UV záření. Tyto degradační mechanismy byly ověřovány na čtyřech typech vzorků.

Základní typ vzorku se skládal z vrstvy termochromních kapalných krystalů nanesených na polyethylenové folii a stal se rovněž základem pro další typy vzorků, které měli zvýšit odolnost křehké struktury termochromních kapalných krystalů. Zvýšená ochrana pro druhý model vzorku spočívala v zalaminování struktury kapalných krystalů mezi dvě skleněné plochy. Třetí a čtvrtý typ vzorku byl opět vyhotoven jako skelný laminát, který byl navíc zboku izolován. Boční izolace u vzorku typu tři spočívala v silikonové izolační hmotě a u posledního čtvrtého typu byla založena na epoxidové těsnící hmotě. Tyto úpravy měly především zajistit větší odolnost vůči vysoké vzdušné vlhkosti a nasákavosti v případě ponoření. V rámci zamezení falešně pozitivních či negativních výsledků testů, které by byly způsobené vadami jednotlivých vzorků, byly testy vždy prováděny ve trojicích, takže celkový počet vyrobených vzorků stoupl na 36 kusů.

Výsledky testování degradace při 93 % relativní vlhkosti vzduchu přinesli závěr, že je zcela jasný rozdíl v typu degradace mezi kapalnými krystaly bez laminace a kapalnými krystaly, které byly opatřeny ochranou ze skelného laminátu. U nechráněných kapalných krystalů ve vzorku typu jedna došlo k výskytu mrtvého bodu, tedy bodové ztrátě termochromních vlastností, nicméně se jednalo o izolovaný případ jednoho vzorku ze tří. Není tedy možné stanovit jasný závěr, zdali je příčina tohoto selhání právě ve zvýšené vlhkosti vzduchu. U vzorků, jenž byly opatřeny ochranou ze skelného laminátu se vyskytla deformace v podobě změny barevné odezvy na konkrétní teplotu, což mohlo být způsobeno tím, že u daných vzorků došlo k absorpci vzdušné vlhkosti, které se ve vzorku díky laminátové struktuře kumulovala a mohla negativně působit na termochromní vrstvu. V případě zalaminovaných vzorků dopadly nejhůře vzorky druhého typu, a to konkrétně s 66,6 % degradované plochy po 480 hodinách testování. Druhé skončili vzorky třetího typu s 60,5 % degradované plochy a nejlépe dopadly vzorky čtvrtého typu, kdy celková míra degradace plochy vzorků dosáhla pouhých 3 %. Z těchto dat jsme došli k závěru, že pro případ využití zalaminovaných kapalných krystalů je nejvhodnější použít izolaci na bázi epoxidové izolační hmoty (v našem případě hmota Rako GE 122).

Dalším provedeným testem bylo ponoření vzorků ve vodní lázni. Výsledky tohoto testu se opět značně lišili pro zalaminované vzorky a vzorky bez laminace. U vzorků bez laminace došlo ke ztrátě sytosti barev, a to hned po prvních 120 hodinách testování. Dále došlo k výskytu mrtvých bodů bez termochromních vlastností, které s postupujícím časem rostly a v posledním testovacím intervalu, tedy po 480 hodinách, došlo ke gradaci tohoto poškození až na 93,6 % plochy všech vzorků. Další tři typy vzorků obsahující krycí vrstvu skla projevovali stejné změny ve svých termochromních vlastnostech, jak tomu bylo i u expozice zvýšenou vlhkostí vzduchu, tedy změnou barevné odezvy na specifickou teplotu. Mezi laminátovými vzorky dopadl nejhůř vzorek druhého typu bez boční izolace, a to s celkově 89,1 % poškozené plochy. Vzorek třetího typu se silikonovou izolací dopadl o něco lépe s celkovým poškozením 51,4 % plochy.

Stejně jako v případě expozice zvýšenou vlhkostí vzduchu dopadl nejlépe vzorek využívající izolaci na bázi epoxidové těsnící hmoty s poškozením necelého jednoho procenta plochy. Tento výsledek jen potvrdil výsledky z měření expozice zvýšenou vlhkostí, že použitá epoxidová těsnící hmota velmi dobře zabraňuje jak navlhání, tak i nasáknutí laminátové struktury.

Třetí test, který ověřoval degradační charakteristiky vybrané látky, se zabýval cyklickými změnami teplot. Výsledky tohoto testu neprokázali žádnou ztrátu či degradaci termochromních vlastností látky po vystavení cyklickým změnám teplot.

Čtvrtým a posledním zkoumaným degradačním činitelem bylo UV záření. Výsledky tohoto testu nám poskytli informace o tom, že s kumulující se expozicí intenzivního UV záření dochází k postupnému tmavnutí termochromní vrstvy a ztrátě sytosti odrážejících barev. V posledním fázi testování se také ve struktuře kapalných krystalů začali objevovat bodové defekty vykazující změny v barevné odezvě. Tyto bodové defekty byly rovnoměrně rozptýleny po celé ploše vzorku. Nicméně další cenná informace získaná z výsledků testování byla, že sodnovápenaté sklo dokázalo efektivně odrazit či absorbovat dopadající UV záření a tím zabránit degradačním pochodům, které byly pozorovány u nechráněných vzorků. Degradační činitel v podobě zvýšené teploty byl záměrně vynechán, jelikož tento činitel byl již ověřen během dvouměsíčního testování hysterezních vlastností při 37 °C. Během tohoto testování bylo pozorováno mírné znehodnocení látky v podobě ztráty sytosti barev a to především u zelené a modré barvy. U ostatních barev bylo poškození téměř neznatelné.

12.3 Využitá TLC pro mapování rozložení tepla

Jedním z cílů bylo ověření praktického využití termochromních kapalných krystalů při mapování rozložení tepla a tepelného namáhání osazené DPS. Jako první byla změřena a porovnána kvalita smáčení povrchů roztokem s kapalnými krystaly, který byly pro účel mapování distribuce tepla vybrán. Smáčecí úhel se pro různé povrchy nacházel v intervalu od 23° pro materiál FR4 až po 38° pro materiál FR4 s černým lakem. Smáčecí úhel byl tedy v oblasti dobrého a velmi dobrého smáčení.

Druhým krokem bylo nalézt optimální metodu pro nanášení roztoku s kapalnými krystaly. Jako velmi efektivní se ukázalo použití modelářské stříkací pistole, připojené na kompresor či technický rozvod stlačeného vzduchu. V obou případech nejlépe s bezolejovou technologií, jelikož olej by mohl aplikovaný roztok znehodnotit. Tato metoda poskytovala vysokou rychlost nanášení, dostatečnou přesnost a rovnoměrnost nanášené vrstvy.

Alternativně je také možné nanášet roztok kapalných krystalů pomocí jemného štětce, což se ukázalo být jako nenákladné řešení, které se sebou ovšem nese menší komfort a rychlost nanášení a tloušťka nanesené vrstvy není zcela homogenní.

Výše uvedenými metodami byla na očištěné DPS s vrstvou černého laku nanesena vrstva kapalných krystalů a daná DPS byla připojena na elektrické napětí. Mezi testovanými DPS byl spínaný zdroj s výkonem 65 W, který obsahoval jak vývodové, tak SMD součástky, ale především obsahoval výkonové součástky produkující velké množství ztrátového tepla. Dále byla vrstva kapalných krystalů nanesena na celou základní desku ze starého stolního počítače. Na této desce jsme chtěli ověřit, jak dobře je možné pozorovat jemné HDI struktury, malé SMD součástky, chladiče a také neelektrické části jako jsou plastové konektory.

Jak se během těchto pokusů ukázalo, tak termochromní kapalně krystaly jsou z hlediska pozorování jemných HDI struktur velice užitečným nástrojem, a to z toho důvodu, že jediné, čím jsme v rozlišení omezeni, je rozlišovací schopnost lidského oka pozorovatele. Celý proces prohřívání je možné sledovat živě a zcela přirozeně, bez nutnosti dalších přístrojů. Právě díky tomu je možné jednoduše určit, které části DPS a součástky jsou nejvíce namáhány a jak se ztrátové teplo šíří. Díky těmto informacím je následně možné optimalizovat tepelný návrh DPS.

Během testování se ukázali i nedostatky této technologie, a to především omezený rozsah teplot a přesnost, která může být ovlivněna individuálními schopnostmi pozorovatele rozpoznat barevné změny.

13 Závěr

V první části této práce jsou teoreticky shrnuty principy chromismu s důrazem na jeho specifický případ, kterým je termochromismus. Termochromismus jako takový se vyskytuje u dvou druhů látek, a to u leuko barviv a kapalných krystalů. Zvláštní pozornost byla věnována kapalným krystalům a jejich rozdílným strukturám (diskotické, kalamitické a lomené) a také rozdílným fázím těchto struktur. Dále práce popisuje princip vlivu teploty na změnu fáze a následnou změnu optických vlastností látky. Poslední dvě teoretické kapitoly se věnují možnostem výroby a užívaným formám termochromních kapalných krystalů, a to především na cholesterické bázi.

Druhá část této práce se zabývala trojicí praktických úkolů, z nichž prvním bylo ověření základních parametrů a vlastností jako jsou maximální přípustná teplota, hystereze termochromních vlastností a rozlišovací a měřicí schopnost. Druhý úkol praktické části se zabýval degradačními mechanismy, působícími na termochromní strukturu kapalných krystalů. Testování probíhalo na čtyřech typech vzorků a mezi testovanými degradačními činiteli byli zvýšená vlhkost vzduchu, ponoření ve vodní lázni, cyklické změny teplot a expozice intenzivnímu UV záření. Nepřímo bylo také otestováno působení dlouhodobě zvýšené teploty, a to při testování hysterezních vlastností. Třetím praktickým úkolem bylo nanesení a použití termochromních kapalných krystalů pro zmapování rozložení tepla na osazených deskách plošných spojů. Všechny tyto úkoly se podařilo úspěšně splnit a shrnuté a okomentované výsledky praktické části jsou dostupné v předposlední dvanácté kapitole.

Cílem poslední části bylo porovnání technologií termochromních kapalných krystalů a termokamer, za účelem mapování distribuce tepla v oblasti vývoje elektrotechniky. Ze zkušeností získaných při vypracování této práce jsme dospěli k závěru, že technologie TLC má jasné výhody v oblastech rozlišení a ostrosti obrazu, které jsou principiálně omezené pouze rozlišovací schopností lidského oka a není tak problém sledovat i jemné HDI struktury. Naopak technologie termokamer má své silné stránky v nabízeném teplotním rozsahu a univerzálnosti svého použití. Z hlediska uživatelského komfortu nebylo možné jednoznačně učít, která z těchto technologií je lepší. Argumentem vyzdvihujícím termokamery je, že jejich použití je obecně velmi jednoduché a není potřeba se zabývat aplikací jednotlivých vrstev, jak je tomu u kapalných krystalů. Naopak důvodem pro volbu kapalných krystalů je fakt, že sledování teplotních změn na daném povrchu je s pomocí kapalných krystalů zcela přirozené a intuitivní. Záleží tedy na osobních preferencích, které budou pravděpodobně zohledňovat četnost a konkrétní parametry daného měření.

Posledním a pravděpodobně nejzásadnějším porovnávaným parametrem byla cena. Cenové náklady na jeden čtvereční metr, při použití TLC byly přibližně 1000 Kč vč. DPH, což je relativně nízká částka v kontrastu pořizovacími náklady profesionálních termokamer, které se pohybují v řádu statisíců korun. Stejně jako v případě uživatelského komfortu není možné určit, která technologie je výhodnější. Opět záleží na individuálních parametrech dané aplikace, kde je třeba zvážit četnost a rozsah využití.

Závěr této práce je takový, že technologie termochromních kapalných krystalů jistě nabízí rozšíření možností mapování teplotních polí, ať už v oblasti elektrotechnického průmyslu i mimo něj. Další postup při výzkumu a vývoji je v této oblasti možný například v automatickém zpracování a analýze obrazu pomocí výpočetní techniky. Takovýto obraz lze získat levnými a komerčně dostupnými CMOS snímači a následné číslicové zpracování takto získaných vstupů by dále zvýšilo komfort užívání a vedlo by k eliminaci lidského faktoru.

Použitá literatura

- [1] Textilní fyzika: Chromismus a jeho aplikace I a jeho aplikace I. *Technická univerzita Liberec* [online]. Technická univerzita Liberec: Technická univerzita Liberec, 2016 [cit. 2016-08-21]. Dostupné z: http://dirk.kmi.tul.cz/depart/ktc/sylaby/Textilni_Fyzika/9.Chromismus%20I.pdf
- [2] MUTHYALA, Ramaiah. *Chemistry and applications of leuco dyes*. 1. New York: Plenum Press, c1997. ISBN 03-064-5459-9.
- [3] Photochromic dye transition. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-08-21]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f9/Photochromic_dye_transition.png
- [4] FISCH, Michael R. *Liquid crystals, laptops and life*. 1. River Edge, NJ: World Scientific, c2004. ISBN 98-123-8901-6.
- [5] SVOBODA, Jiří a Milada GLOGAROVÁ. *Kapalné krystaly* [online]. Vysoká škola chemicko-technologická, Technická 5, 166 28, Praha 6, 2005 [cit. 2016-08-27]. Dostupné z: http://kubusz.net/Reserse/new/1/9_axial_chirality/9_9_Svoboda.pdf
- [6] URBAN, František. *Optoelektronika* [online]. VUT Brno UMEL, 2002 [cit. 2016-08-28]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/oks/cz/pdf/skripta.pdf>
- [7] LEMIEUX, Robert. Organic Materials. In: *Queen's university* [online]. Queen's university: Department of Chemistry, 2014, s. 5 [cit. 2016-08-28]. Dostupné z: <http://faculty.chem.queensu.ca/people/faculty/lemieux/Research.asp>
- [8] Kebes. Liquid crystal. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-08-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_crystal
- [9] VŠETIČKA, Martin a Jaroslav REICHL. Encyklopedie fyziky: Polarizace dvojlomem. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. Praha 1: SPŠST Panská, 2007 [cit. 2016-09-10]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [10] GLOGAROVÁ, Milada. Kapalné krystaly. *Fyzikální ústav Akademie věd ČR* [online]. Na Slovance 2, 182 21 Praha 8: Fyzikální ústav Akademie věd ČR, 2005 [cit. 2016-09-10]. Dostupné z: <http://emf-9.fzu.cz/lidi/glogarova/kapkrystaly/Kap-krystHTML2.htm>

- [11] The origin of chirality in colloidal liquid crystals. *Soft condensed matter group* [online]. 2015 [cit. 2016-09-10]. Dostupné z: <http://colloid.nl/people/marjolein-dijkstra/?tab=research>
- [12] Liquid crystal polarizes light reflection question. *Physics* [online]. 2012 [cit. 2016-09-10]. Dostupné z: <http://physics.stackexchange.com/questions/32178/liquid-crystal-polarizes-light-reflection-question>
- [13] BLAHNÍK, Roman. *Teorie vlivu vlhkosti na izolanty*. 1. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1969.
- [14] Adsorpce. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-09-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Adsorpce>
- [15] Synergy. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-09-14]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Synergy>
- [16] TLC PRODUCTS FOR USE IN RESEARCH AND TESTING APPLICATIONS. *TLC Hallcrest* [online]. Glenview, IL: TLC Hallcrest, 2015 [cit. 2016-11-13]. Dostupné z: http://www.hallcrest.com/DesktopModules/Bring2mind/DMX/Download.aspx?Command=Core_Download&EntryId=159&language=en-US&PortalId=0&TabId=163
- [17] TLC-100™: Thermochromic Liquid Crystal kit. *Advanced Thermal Solution* [online]. Thermochromic Liquid Crystal kit: Norwood, MA 02062, USA, AdvancedThermalSolution [cit. 2017-01-14]. Dostupné z: <https://www.qats.com/Products/Instruments/Surface-Thermography/TLC-100>
- [18] LISENSKY, George. *Preparation of Cholesteryl Ester Liquid Crystals* [online]. Beloit College, 2013 [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: https://chemistry.beloit.edu/edetc/nanolab/LC_prep/index.html
- [19] Soda-lime glass. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Soda-lime_glass#cite_note-5
- [20] PŘIKRYL, T. Absorpční charakteristiky namáhaných drážkových izolací. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdenka Rozsivalová.

- [21] STARÝ, Jiří a Miroslav ZATLOUKAL. *Montážní a propojovací technologie*. Brno, 2014. Skriptum.
- [22] Povrchové napětí a kapilarita. *Fyzikální vlastnosti živých organizmů* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <http://kof.zcu.cz/vusc/pg/termo09/mechanics/v/v2.htm>
- [23] VAVŘINOVÁ, Jana. *Význam UV filtru u kontaktních čoček*. Brno, 2016. Bakalářská práce. MASARYKOVA UNIVERZITA. Vedoucí práce Mgr. Pavel Beneš, Ph.D.
- [24] FLIR GF309 Infrared Cameras. *FLIR: Gas detection systems* [online]. Portland: FLIR, 2017 [cit. 2017-03-03]. Dostupné z: <http://www.flir.com/ogi/display/?id=55667>
- [25] FLIR Electronics. *FLIR* [online]. Portland: FLIR, 2017 [cit. 2017-03-03]. Dostupné z: <http://www.flir.com/electronics/>
- [26] FLIR Research and Science. *FLIR* [online]. Portland: FLIR, 2017 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://www.flir.com/science/display/?id=61101>
- [27] FLIR Instruments. *FLIR* [online]. London: FLIR, 2017 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://www.flir.co.uk/instruments/display/?id=65813>
- [28] Contact angle. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Contact_angle
- [29] Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5. EMERY, Keith. RReDC: Renewable Resource Data Center [online]. [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>
- [30] Datasheet Labino PH135. *Labino* [online]. Švédsko: Labino, 2017 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://labino.com/wp-content/uploads/2014/04/Labino-MPXL-TrAc-Light-UV.pdf>
- [31] Fate and Transport of Ultraviolet Radiation. *University of Minnesota* [online]. Minneapolis: University of Minnesota, 2003 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://enhs.umn.edu/current/5103/uv/fate.html>